

Masterarbeit:

**Maßnahmen zur Verschleißminderung
von Ketten**



Lehrstuhlleiter:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Franz Kessler
Lehrstuhl für Fördertechnik und Konstruktionslehre
Montanuniversität Leoben



In Kooperation mit PEWAG Austria GmbH



Erstellt von:

Kogler Gabriel



Danksagung

Zunächst möchte ich mich an dieser Stelle bei jenen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben.

Dank möchte ich an Herrn Dipl.-Ing. Markus Scheibner von der Firma PEWAG Austria GmbH aussprechen, der diese Arbeit in Auftrag gegeben hat und mich dabei sehr hilfreich und mit höchster Motivation unterstützt hat.

Ganz besonders gilt mein Dank Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Franz Kessler, der es mir ermöglicht hat, meine Masterarbeit am Lehrstuhl für Fördertechnik und Konstruktionslehre zu schreiben.

Auch Herrn Dipl.-Ing. Dr. mont. Michael Prenner vom Lehrstuhl für Fördertechnik und Konstruktionslehre, möchte ich für die Unterstützung bei der Erstellung dieser Masterarbeit danken. Er stand mir immer mit Rat und wertvollen Hilfestellungen zur Seite.

Letztendlich bedanke ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden, die mir immer mit gutem Rat zur Seite stehen und mit deren Hilfe ich über mich selbst hinauswachsen konnte.



Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit mit dem Titel **„Maßnahmen zur Verschleißminderung von Ketten“** selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Leoben, am 23.01.2017

Kogler Gabriel Christian



Kurzfassung

Diese Arbeit befasst sich im speziellen mit verschleißmindernden Maßnahmen in der Kettentechnologie. Als erstes gibt es einen Einblick in den technischen Verschleiß mit allen Verschleißmechanismen.

Im Weiteren wird ein großes Spektrum an verschleißmindernden Maßnahmen aufgezeigt welche sich nicht nur auf Ketten beziehen, sondern allgemein anwendbar sind. Als nächsten Schritt werden die am bestgeeignetsten Verfahren im Bezug auf die Kette detailliert präsentiert, sowie auch geeignete Werkstoffe. Ausgewählt werden diese mit einer Nutzwertanalyse in Hinsicht auf Machbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Verschleißoptimierung, bezogen auf eine Kette. Dies ist eine theoretische Optimierung.

Das beste Verfahren wird schlussendlich mit einem passenden Werkstoff auf eine neue Kettengeometrie der Firma PEWAG Austria GmbH angewendet um auch in der Praxis aufzuzeigen, ob es zu einer Verschleißminderung der Kette kommt. Verglichen wird das Ganze mit dem bis dato besten Kompromiss aus Geometrie, Werkstoff und Verfestigungsverfahren, einer Rundstahlkette.

Schlagwörter: Kettenverschleiß ; Kettenoptimierung ; Verschleißmechanismen ; Oberflächenverfestigung ; verschleißmindernde Maßnahmen ; Tribometrie



Abstract

This script is concerned in particular with wear-reducing measures in the chain technology. First, it gives an insight into the technical wear with all wear mechanisms.

A wide range of wear-reducing measures are presented which are not only related to chains but generally applicable. As a next step, the best-suited processes with regard to the chain are presented in detail and also suitable materials. These are selected with a value-in-use analysis with regard to feasibility, cost-effectiveness and wear optimization with respect to a chain. This script contains only a theoretical optimization.

The best method is finally applied to a round steel chain of company PEWAG Austria GmbH to demonstrate also in practice, whether there will be a reduction of wear of the chain. The new Chain Material and surface treatment of the chain is compared to an already used chain of PEWAG.

key words: chain wear ; chain optimization ; wear mechanisms ; surface hardening ; wear-reducing measures ; tribometry



Inhaltsverzeichnis

| | | |
|---------|---|----|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Verschleiß | 3 |
| 2.1 | Allgemein..... | 3 |
| 2.1.1 | Materialoberfläche | 5 |
| 2.2 | Tribologie..... | 7 |
| 2.2.1 | Verschleißgrundmechanismen..... | 10 |
| 2.2.2 | Verschleißarten..... | 13 |
| 3 | Verschleißmindernde Maßnahmen (Stand der Technik)..... | 18 |
| 3.1 | Einführung | 18 |
| 3.2 | Verschleißminderung bei gegebenen Verschleißmechanismus | 20 |
| 3.3 | Verschleißbeständige Werkstoffe..... | 21 |
| 3.3.1 | Verschleißverbesserte Legierungselemente und Werkstoffe | 21 |
| 3.4 | Schmierstoffe | 26 |
| 3.5 | Oberflächenschutzschichten bzw. Verfestigungsverfahren | 27 |
| 3.5.1 | Mechanische Oberflächenverfestigung | 29 |
| 3.5.1.1 | Kugelstrahlen | 30 |
| 3.5.2 | Thermische Verfestigungsverfahren | 32 |
| 3.5.2.1 | Induktionshärten | 32 |
| 3.5.2.2 | Flammhärten | 34 |
| 3.5.2.3 | Laserstrahlhärten | 36 |
| 3.5.2.4 | Vor- und Nachteile der thermischen Härteverfahren | 38 |
| 3.5.3 | Thermochemische Verfestigungsverfahren | 39 |
| 3.5.3.1 | Einsatzhärten | 39 |
| 3.5.3.2 | Nitrieren und Nitrocarburieren | 44 |



| | | |
|---------|--|-----|
| 3.5.3.3 | Borieren..... | 46 |
| 3.5.3.4 | Andere thermochemische Verfestigungsverfahren..... | 48 |
| 3.5.4 | Physical Vapor Deposition (PVD) | 49 |
| 3.5.5 | Chemical Vapor Deposition (CVD)..... | 52 |
| 3.5.6 | Thermisches Spritzverfahren | 54 |
| 3.5.7 | Galvanische Beschichtung..... | 56 |
| 4 | Theoretische Maßnahmen um Kettenverschleiß zu mindern | 58 |
| 4.1 | Geeignete Werkstoffe für Ketten | 59 |
| 4.2 | Verfestigungsverfahren für Kettenwerkstoffe..... | 64 |
| 4.3 | Beste Kombination aus Werkstoff und Härtingsverfahren | 67 |
| 4.4 | Zusammenfassung des Kapitels 4..... | 69 |
| 5 | Praktische Versuche | 70 |
| 5.1 | Vorstellung der geprüften Werkstoffe | 71 |
| 5.1.1.1 | Mögliche Oberflächenbehandlungen | 75 |
| 5.2 | Mögliche Versuchseinrichtungen..... | 78 |
| 5.2.1 | Zugversuch | 78 |
| 5.2.2 | Tribometer und Tribometrie | 86 |
| 5.2.2.1 | Lineartribometer 1 an der Montanuniversität Leoben | 89 |
| 5.2.2.2 | Lineartribometer 2 an der Montanuniversität Leoben | 90 |
| 5.2.2.3 | Schwenktribometer bei der Firma Pewag..... | 93 |
| 5.2.3 | Versuche..... | 98 |
| 5.2.3.1 | Versuchsaufbau mit dem Schwenktribometer der Fa. Pewag | 99 |
| 5.2.3.2 | Versuchsaufbau mit der Kettenzugprüfmaschine der Fa. Pewag | 107 |
| 5.3 | Versuchsauswertung und Diskussion der Ergebnisse..... | 112 |
| 5.3.1 | Schwenktribometer | 112 |
| 5.3.1.1 | Temperaturmessung | 114 |



| | | |
|---------|---|-----|
| 5.3.1.2 | Verschleißprüfung im Kurzzeitbereich | 122 |
| 5.3.1.3 | Verschleißprüfung im Langzeitbereich | 138 |
| 5.3.2 | Kettenzugprüfmaschine | 145 |
| 5.3.2.1 | Kettenzugversuch der Rundstahlkette-18CrNiMo7-6 | 146 |
| 5.3.2.2 | Kettenzugversuch der alten Geometrie (U1TA)-30CrNiMo8 | 147 |
| 5.3.2.3 | Kettenzugversuch der neuen Geometrie (U1TE)-30CrNiMo8 | 148 |
| 5.3.2.4 | Kettenzugversuch der neuen Geometrie (U1TE)-18CrNiMo7-6 ... | 149 |
| 5.3.2.5 | Gegenüberstellung der Zugversuche | 150 |
| 6 | Schlussfolgerung, Zusammenfassung und Ausblick | 153 |
| 7 | Abbildungsverzeichnis | 158 |
| 8 | Abbildungsquellen..... | 162 |
| 9 | Quellenverzeichnis..... | 166 |



1 Einleitung

Motivation:

Abnützungen an der Oberfläche von Werkstoffen sind in der Technik unerwünscht und oft ein großes Problem. Mit diesen Oberflächenveränderungen gehen im Zusammenhang mit Belastungsspitzen Werkstoffversagen und im weiteren Maschinenversagen einher. Aus diesem Grund ist es auch zum Beispiel für Becherwerke von großer Bedeutung das die Ketten nicht Versagen. Der Verschleiß von Ketten ist im Bereich der Berührflächen der Kettenglieder bei Rundstahlketten nicht außer Acht zu lassen. Durch diese Berührung und der Flächenpressung entsteht eine Reibung die die Materialabnahme verursacht und im Weiteren zum Versagen der Kette führen kann. Der Hintergrund dieser Arbeit besteht darin sich mit der Frage auseinanderzusetzen, welche Arten von Verschleißmindernden Maßnahmen gibt es eigentlich auf dem Markt und welche davon kann man zur Verschleißminderung einer Kette wirtschaftlich anwenden, als auch welche passenden Werkstoffe gibt es. Diese großen Mengen an Möglichkeiten werden auf Machbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Verschleißoptimierung geprüft und am Ende, die beste Möglichkeit, in praktischen Versuchen getestet.

Aufbau:

Diese Masterarbeit ist in vier Hauptteile gegliedert: 1. Verschleiß, 2. Verschleißmindernde Maßnahmen, 3. Maßnahmen um Verschleiß von Ketten zu reduzieren, 4. Praktischer Nachweis

Im ersten Kapitel (Kapitel 2) wird der Verschleiß ganz allgemein besprochen. Was ist Verschleiß? Welche Verschleißmechanismen gibt es? Dieses Kapitel wird auf jeden Fall benötigt, um dem Leser auch verständlich zu machen warum man verschleißmindernde Verfahren in der Technologie benötigt und was Verschleiß ganz allgemein ist.



Besonders wird auf die Verschleißmechanismen eingegangen, da diese Mechanismen der Grund für die physikalischen Reaktionen im Werkstoff sind.

Im zweiten Kapitel (Kapitel 3) befasst man sich ohne sich schon auf die Kette zu beziehen mit den verschleißmindernden Maßnahmen. Es gibt auf dem Markt eine große Anzahl an Verfahren zur Verschleißminderung. Die wichtigsten werden in diesem Kapitel behandelt. Es reicht von Oberflächenverfestigung bis hin zu PVD- bzw. CVD-Verfahren oder auch Laserhärten wird vorgestellt. Genauso kann man verschleißbeständige Werkstoffe verwenden oder auch Schmierstoffe. Nicht all diese Verfahren sind für die Kette im Bezug auf die Wirtschaftlichkeit geeignet.

Im dritten Kapitel (Kapitel 4) werden mithilfe einer Nutzwertanalyse die Verfahren herausgefiltert, welche für die Kette in Hinsicht auf Machbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Verschleißoptimierung am besten geeignet sind. Es wird ein detaillierter Einblick in die Verfahren um auch aufzuzeigen, warum diese verschleißmindernden Verfahren für die Kette so gut geeignet sind. Eine Nutzwertanalyse wird auch auf passende Werkstoffe angewendet, um eine Revolution in der Kettentechnologie im Bereich des Werkstoffes zu erhalten.

Im vierten Kapitel (Kapitel 5) wird man weniger Wert auf Theorie und dafür mehr Wert auf die praktische Bedeutung legen. Das effizienteste Verfahren wird in einem praktischen Versuch zeigen wie sehr es den Verschleiß einer Kette unter Belastung und Bewegung (Reibung) senkt. Es soll nachgewiesen werden, dass die Materialabnutzung gemindert wurde, zum Beispiel an den Berührflächen der Kettenglieder einer Rundstahlähnlichen Kette.

2 Verschleiß

2.1 Allgemein

Verschleiß bezeichnet den fortschreitenden Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers (Grundkörper), hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d. h. Kontakt- und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers, also den Masseverlust (Oberflächenabtrag) einer Stoffoberfläche durch schleifende, rollende, schlagende, kratzende, chemische und thermische Beanspruchung. Im allgemeinen Sprachgebrauch wird Verschleiß auch mit anderen Arten der Abnutzung gleichgesetzt. [DIN 50320]

Diese meist unerwünschte Veränderung der Oberfläche tritt zum Beispiel an Lagern, Kupplungen, Getrieben, Düsen und Bremsen auf sowie als Verschleiß von Zerspanungswerkzeugen oder anderen Maschinenelementen. Verschleiß ändert die Geometrie von Bauteilen, sodass diese ihre Funktion verändern. Es folgt dadurch eine Bauteilschädigung und der damit verbundene Ausfall von Maschinen und Geräten. Die Verringerung von Verschleiß ist darum eine wesentliche Möglichkeit, die Lebensdauer von Maschinen und Geräten zu erhöhen und damit Kosten und Rohstoffe einzusparen. Andererseits wird versucht, den nicht zu vermeidenden Verschleiß auf einfach auszutauschende Bauteile einzugrenzen, die man unter dem Begriff Verschleißteil zusammenfasst.[1]

Verschleiß ist immer eine Systemeigenschaft, nicht eine Eigenschaft der beteiligten Komponenten: Es sind immer mindestens zwei Komponenten im Zusammenspiel, häufig noch ein Zwischenmedium (Fluid).



Reibungszustände:

Festkörperreibung

Festkörperreibung ist die Reibung zwischen Stoffbereichen mit Festkörpereigenschaften in unmittelbarem Kontakt.[5]

Flüssigkeitsreibung

Flüssigkeitsreibung ist die Reibung im Stoffbereich mit Flüssigkeitseigenschaften (innere Reibung). Dieser Reibungszustand ist auch für eine die Festkörper vollständig trennende flüssige Stoffschicht zutreffend.[5]

Gasreibung

Gasreibung ist die Reibung im Stoffbereich mit Gaseigenschaften (innere Reibung). Dieser Reibungszustand ist auch für eine die Festkörper vollständig trennende gasförmige Stoffschicht zutreffend.[5]

Mischreibung

Mischreibung nennt man jede Mischform der Reibungszustände, primär der Festkörper- und Flüssigkeitsreibung.[5]

Einflussgrößen der Höhe des Verschleißes:

- Grundkörper (Werkstoff, Form, Oberfläche)
- Zwischenstoff (Art, Teilchengröße u. a.)
- Gegenkörper (Werkstoff, Form, Oberfläche)
- Belastung (Größe, zeitlicher Verlauf)
- Art der Bewegung (gleitend, rollend, stoßend)
- umgebende Atmosphäre (z. B. Luft, Schutzgas, Vakuum)
- Temperatur (Höhe, zeitlicher Verlauf)

Die **Verschleißfestigkeit** ist die Widerstandsfähigkeit eines festen Körpers gegen Verschleiß (mechanischer Abrieb).[DIN 50320]

Die Kombination aus Härte und Festigkeit eines Materials spielen beim Verschleiß eine große Rolle. Es reicht nicht, dass ein Werkstück besonders hart ist, um Verschleiß zu verhindern. Ist der Werkstoff sehr hart, ist er oft auch sehr spröde. Dies führt dazu, dass das Material schwer zu verformen ist. Enthält der Kern des Stahls also keine sinnvolle Zähigkeit, zerbricht der Werkstoff ab einem bestimmten Punkt. Ist das Material jedoch zu zäh, tritt der Verschleiß gerade an der Oberfläche schneller ein, als bei härteren Metallen. Ein gutes Verhältnis zwischen Härte an der Außenseite und Zähigkeit im Kern des Bauteils ist also sehr wichtig auch im Bezug auf den Verschleiß. [2]

ökonomische Verluste durch Verschleiß:

- etwa 2 bis 7% des Bruttosozialproduktes (ca. 35 Mrd. € / Jahr alleine in Deutschland!)
 - bis zu 10% der eingesetzten Primärenergie
 - **direkte Verluste** durch Erneuerung oder Überarbeitung von Bauteilen
 - **indirekte Verluste** durch Produktionsausfälle, Wartungskosten, Lagerhaltung
 - **zusätzliche Verluste** durch verteuerte Produktion, verschlechterte Qualität und Produktivität sowie Verlust von Marktanteilen
- [Deutsches Marktforschungsinstitut]

2.1.1 Materialoberfläche

Die Beschreibung des Tribosystems in der herkömmlichen Weise macht nur geringe Angaben über die Struktur und die geometrische Ausbildung der Oberfläche. Tatsächlich hat aber die Form der Oberfläche einen wesentlichen Effekt auf das Auftreten der Reibungskräfte und des Verschleißes.

Die Beschreibung der Gestaltabweichung von Oberflächen ist durchgehend genormt. Dies betrifft Formabweichungen, Welligkeiten und Rauheiten. Die Rauheiten werden dabei in drei Größenklassen unterteilt:

Rauheiten durch den Bearbeitungsvorgang, durch die Gefügestruktur sowie durch den atomaren Gitteraufbau des Werkstoffes. Die Rauheiten werden in der industriellen Praxis nach Norm durch Kenngrößen beschrieben, die mit Tastschnittverfahren ermittelt werden.[8]

Abbildung 1 veranschaulicht die Gestaltabweichungen von Oberflächen.

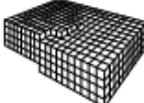
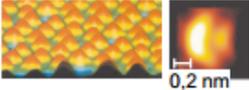
| Ordnung und Bezeichnung | Gestaltabweichung in überhöhter Darstellung | Beispiel für die Art der Abweichung | Beispiel für die Entstehungsursache |
|---------------------------|---|---|--|
| 1. Formabweichung |  | Geradheits- Rundheits- Abweichung | Fehler in Maschinenführung Härteverzug Durchbiegung der Maschine |
| 2. Welligkeit |  | Wellen | Außermittige Einspannung Schwingungen der Maschine |
| 3. sub-mm Rauheit |  | Rillen | Form der Werkzeugschneide Vorschub Zustellung |
| 4. μ -Rauheit |  | Riefen Schuppen | Vorgang der Spanbildung Werkstoffverformung beim Strahlen |
| 5. sub- μ -Rauheit |  | Gefügestruktur | Kristallisationseffekte Beiz- oder Korrosionsvorgänge |
| 6. nano-Rauheit |  | Gitteraufbau des Werkstoffes | Atomanlagerungsvorgänge Versetzungen an der Oberfläche |
| 7. sub-nano Rauheit |  | Elektronenbahnen | Wellenfunktionen der Elektronen |

Abbildung 1: Gestaltabweichungen der Oberfläche

2.2 Tribologie

Tribologie (griechisch: Reibungslehre) befasst sich mit der wissenschaftlichen Beschreibung von Reibung, der Berechnung und Messung von Reibungskoeffizienten, dem Verschleiß und der erforderlichen Schmierung zwischen aufeinander einwirkenden, in Relativbewegung befindlichen Oberflächen. Dies schließt auch die Entwicklung von Technologien zur Optimierung von Reibungsvorgängen ein, die sich als „wechselwirkende Oberflächen in relativer Bewegung“ oder „tribologisches System“ beschreiben lassen. Die bekannteste Rechengröße der Tribologie ist der Reibungskoeffizient. Die Tribologie untersucht Reibung, Schmierung und Verschleiß von Lagern, Führungen, Getrieben, Motoren und anderen Maschinenelementen. Neben der Entwicklung geeigneter Schmierstoffe stehen Fragen der Werkstoffauswahl, der Oberflächenbehandlung und -beschichtung und der Oberflächentopografie im Vordergrund aktueller Entwicklungen.[4]

Die Berücksichtigung tribologischer Zusammenhänge bewirkt beträchtliche Einsparungen bei Energie- und Materialeinsatz, Produktion und Instandhaltung. Energie- und Rohstoffressourcen werden geschont, Umweltschäden vermieden und der Arbeitsschutz verbessert. [4]

Ein tribologisches System mit direktem Festkörper/Festkörper-Kontakt kann zu Festkörperverschleiß führen, in einem Festkörper/Schmierstoff/Festkörper-System kann Verschleiß infolge von Misch- oder Grenzreibung auftreten. Im Weiteren wird zwischen Verschleißmechanismen und Verschleißarten unterschieden. Dabei sind mit Verschleißmechanismen die physikalischen und chemischen Prozesse benannt, die durch einen Verschleißvorgang und aufgrund von kräftemäßigen und stofflichen Wechselwirkungen entstehen. Bei der Einteilung in verschiedene Verschleißarten wird eine Unterscheidung nach der Art der tribologischen Beanspruchung und der beteiligten Stoffe getroffen. [5]

Die messtechnische oder zahlenmäßige Beurteilung des Verschleißes und der Verschleißvorgänge wird durch zwei Begriffe charakterisiert:

- Verschleißmessgrößen: Kennzeichnung des Verschleißes durch Maßzahlen, die eine Gestalt- oder Masseänderung eines Körpers hervorrufen.
- Verschleißerscheinungsformen: Kennzeichnung der durch Verschleiß auftretenden Veränderungen der Oberflächen tribologisch beanspruchter Werkstoffe unter Berücksichtigung von Art und Form der Verschleißpartikel. [5]

Abbildung 2 zeigt schemenhaft ein tribologisches System.

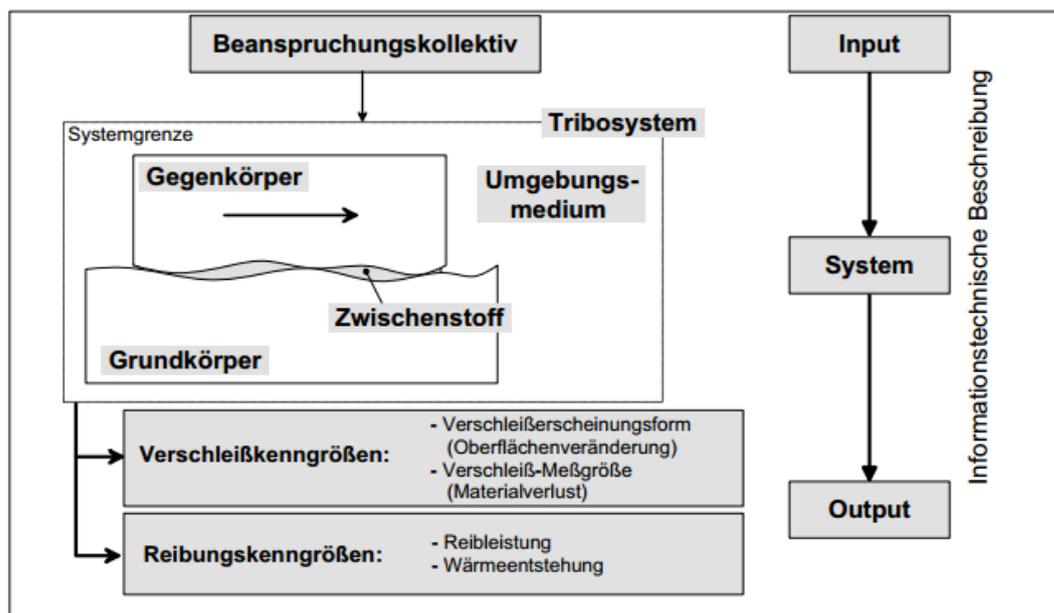


Abbildung 2: Tribologisches System

Das bei jedem Verschleißvorgang wirkende Beanspruchungskollektiv wird gebildet durch:

- die Bewegungsform und den zeitlichen Bewegungsablauf (Kinematik)
- die technisch-physikalischen Beanspruchungsparameter[DIN 50281]

Bewegungsform und zeitlicher Bewegungsablauf. Die bei Verschleißvorgängen auftretenden Bewegungsformen können auf die folgenden vier „Elementar-Bewegungsformen“ oder deren Überlagerungen zurückgeführt werden:

- Gleiten
- Rollen
- Stoßen
- Strömen[DIN 50281]

Die technisch-physikalischen Beanspruchungsparameter bei einem Verschleißvorgang sind durch die folgenden vier Größen gegeben:

- Normalkraft F_N
- Geschwindigkeit
- Temperatur
- Beanspruchungsdauer[DIN 50281]

Der Zwischenstoff aus Abbildung 2 ist entweder ein Schmiermittel, Bedeckungsschichten (Wasser), Oxidschichten, Reaktionsschichten oder Materialübertrag.

Alle Fläche, auch wenn sie uns noch so glatt erscheinen sind in Wirklichkeit uneben. Reibung ist die Kraft, die erforderlich ist, um einen Gegenstand auf einer Fläche zu bewegen. Überall wo Reibung auftritt, wird auch Verschleiß auftreten.[Autor unbekannt]

2.2.1 Verschleißgrundmechanismen

Verschleißmechanismen lösen Elementarprozesse aus, die zu Stoff- und Formänderung der Kontaktpartner führen. Diese Mechanismen beginnen in den örtlich und zeitlich stochastisch verteilten Mikrokontakten und sind zudem von der Struktur des tribologischen Systems und vom Beanspruchungskollektiv abhängig. Bei der Berührung technischer Oberflächen nimmt die Größe der wahren Kontaktfläche (Summe der Mikrokontakte) in erster Näherung mit der Normalkraft zu. Infolge elementarer Wechselwirkungen kontaktierender Werkstoffe treten unterschiedliche Verschleißmechanismen auf, die vereinfacht folgendermaßen eingeteilt werden:

- Kräftemäßige, spannungmäßige oder energetische Wechselwirkung, die zu Rissvorgängen und Stoffabtrennung an den sich berührenden Werkstoffe führen und durch die Mechanismen „Oberflächenzerrüttung“ und „Abrasion“ gekennzeichnet sind.
- Atomare und molekulare Wechselwirkungen, die auf die Entstehung chemischer Bindungen im Kontaktbereich sich berührender Werkstoffe rückführbar sind und die unter Einwirkung des Umgebungsmediums und auftretende Materialabtrennprozesse durch die Mechanismen „Adhäsion“ und „Tribochemische Reaktionen“ beschrieben sind.[5]

Abrasion (Ritzverschleiß durch Mineralien)

Abrasion tritt immer dort auf, wo ein fester Körper mit schroffer Oberfläche auf einen weichen Gegenkörper trifft. Über Reibung, Stoß, Strömung oder rotierende Schwingungen werden kleine Teilchen in das weichere Material eingedrückt oder abgeschabt. Abrasion kann auch mittels einer Flüssigkeit hervorgerufen werden, welche raue, harte oder kantige Teilchen wie z.B. Sand mit sich führt. Durch die Fließbewegungen reiben mitgeführte Teilchen an dem Gegenkörper und schaben aus der Oberfläche Partikel heraus. Dies nennt man auch Hydroabrasion.[2]

Adhäsion (Reibung Metall gegen Metall)

Verschleiß durch Adhäsion tritt nur bei Körpern auf, deren Zusammensetzung bezüglich der Struktur des Metalls sehr ähnlich ist. Bei durch Gleit- und Schwingbewegungen fest aufeinander gepresster Körper tritt in den Grenzflächen Abrieb auf. Es entstehen Löcher, Wölbungen oder Materialschuppen. Das abgeriebene Material verbindet sich miteinander und bleibt an der Oberfläche haften. Dies nennt man auch Kaltverschweißung. Mittels ausreichender Schmierung kann dieser Verschleiß verhindert bzw. minimiert werden.[2]

Oberflächenzerrüttung (Ermüdung durch Schläge, Drücke, Stöße)

Unterstützt wird dieser Verschleißmechanismus durch Rollbewegungen, Stoßen, Schwingungen, Schleifen oder Strömen, welche in wechselnder Abfolge auftreten. Diese Bewegungen verursachen eine Ermüdung des Werkstoffes und damit den Zerfall der intakten Oberfläche. Es entstehen Grübchen, auch Pittings genannt, und kleine Risse, die sich durchaus erweitern und zum Bruch führen können. Auch hier verhindert eine ausreichende Schmierung den Verschleiß.[2]

Tribochemische Reaktion – Tribooxidation

Durch das aneinander Gleiten, Schwingen oder Strömen zweier Körper kann es auf Grund chemischer Reaktionen an den Oberschichten zur Bildung von Oxidschichten führen. Die Verwendung von Edelmetallen, Kunststoffen oder Keramiken beeinflussen diese Verschleißmechanismus positiv.[2]

In Abbildung 3 sieht man skizziert wie diese Verschleißmechanismen aussehen.

| Mechanismen | | Verschleißformen |
|----------------------------|--|---|
| Abrasion | | Kratzer, Riefen, Mulden, Wellen |
| Adhäsion | | Materialübertrag; Kaltpreßschweißung, Fresser, Schuppen, Kuppen, Löcher |
| Tribochemische Reaktion | | Reaktionsprodukte: Schichten, Partikel |
| Oberflächen- ermüdung | | Zungen (Keile), Risse (Delamination, Butterflies), Grübchen (Pittings) |

Abbildung 3: Verschleißmechanismen

Abbildung 4 zeigt Beispielbilder zu den jeweiligen Verschleißmechanismen.

| | | |
|--|--|---|
| | | <p>Verschleißmechanismen und ihr Erscheinungsbild:</p> <p>A Oberflächenzerrüttung Dauerschwing-Rastlinien, Rissbildung und Partikelbildung durch tribologische Ermüdungs-Wechselbeanspruchung</p> <p>B Abrasion Riefenbildung und Materialabtrag durch ritzende Beanspruchung (Mikrospanen, Mikrospflügen, Mikrobrechen)</p> <p>C Adhäsion Bildung und Trennung von (atomaren) Grenzflächen-Haftverbindungen mit „Kaltverschweißungen“ und Materialübertrag („Fressen“)</p> <p>D Triboreaktionen Bildung von Reaktionsprodukten durch chemische Reaktionen (aktiviert durch Reibungsenergie) tribologisch beanspruchter Kontaktpartner</p> |
| | | |

Abbildung 4: Beispiele zu den Verschleißmechanismen

2.2.2 Verschleißarten

Sie kennzeichnen die verursachende Form der Beanspruchung. Verschleißarten sind beispielsweise Gleitverschleiß, Stoßverschleiß, Prallverschleiß, Rollen- bzw. Wälzverschleiß, Strahlverschleiß, Schwingungverschleiß und Erosion.

Prallverschleiß

Maschinenteile sind einem ständigen Aufschlagen von Materialien wie zum Beispiel Steinen, Kies, Schotter ausgesetzt. Diese Abnutzung nennt man Prallverschleiß. Zum Schutz dieser Bauteile werden Prallplatten angebracht.[2]

Gleitverschleiß

Bauteile reiben mittels gleitenden Bewegungen aneinander. Diesen Gleitverschleiß findet man zum Beispiel in Motoren. Der Kolben reibt durch seine Bewegungen an dem Zylinder und verursacht hierbei die Abnutzung. Es kommt zur Verformung der Oberflächen und es entstehen so genannte Zungen. Auch kleinste Partikel können an der Oberfläche reiben, so dass es zu Rissen, Kratzern oder Abtragung von Material kommen kann. Abbildung 5 zeigt einen Gleitverschleiß.[2]

Stoßverschleiß

Die aneinander stoßende Bewegungen von Bauteilen oder anstoßende Materialien auf ein Bauteil, wie dies beispielsweise bei Zerkleinerungsanlagen zu finden ist, entsteht Stoßverschleiß. Dabei werden die Oberflächen verformt, es kann zu Riss oder Materialabtragungen kommen.[2]

Rollen- bzw. Wälzverschleiß

Walzen oder Rollen bewegen sich mit hoher Presskraft auf einem Körper. Es wirken Druckkräfte und Reibungskräfte auf die Werkstoffoberfläche, welche eine Oberflächenzerrüttung zur Folge haben. Es können Risse an der Oberfläche und auch im inneren des Werkstoffes entstehen, welche die Bildung von Grübchen begünstigt. Abbildung 6 zeigt den Wälzverschleiß. [2]

Fretting

Schwingungsreibverschleiß: Ergebnis mehrerer gleichzeitig ablaufender Schadensmechanismen durch oszillierende Relativbewegungen der Kontaktpartner: Entstehung von Verschleißpartikeln durch Abrasion, Schwingbruch u. Materialübertragung. Abbildung 7 zeigt ein Beispiel von Fretting-Verschleiß.[2]

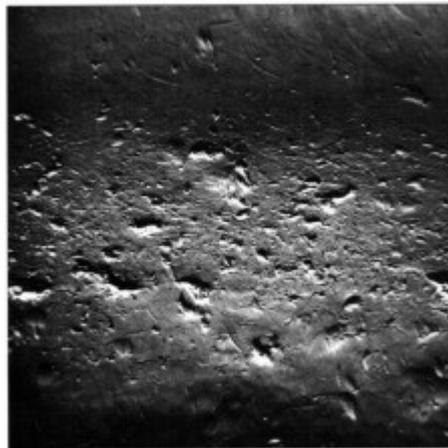


Abbildung 5: Gleitverschleiß

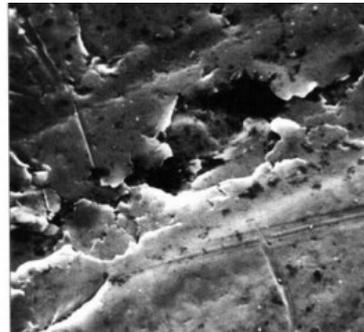


Abbildung 6: Wälzverschleiß

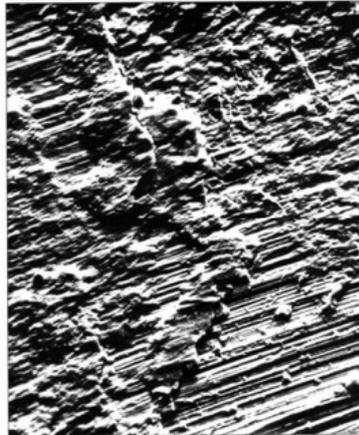


Abbildung 7: Verschleiß
durch Fretting

Erosionsverschleiß

Verursacht durch Gas- oder Flüssigkeitsströmung ohne bzw. mit enthaltenen Teilchen. Abbildung 8 zeigt einen Erosionsverschleiß.[6]

Kavitationsverschleiß

Wiederholte Beanspruchung von Werkstoffoberflächen durch kurzzeitig wirkende Flüssigkeitsstöße. Abbildung 9 verdeutlicht den Kavitationsverschleiß.[6]



Abbildung 8: Erosionsverschleiß

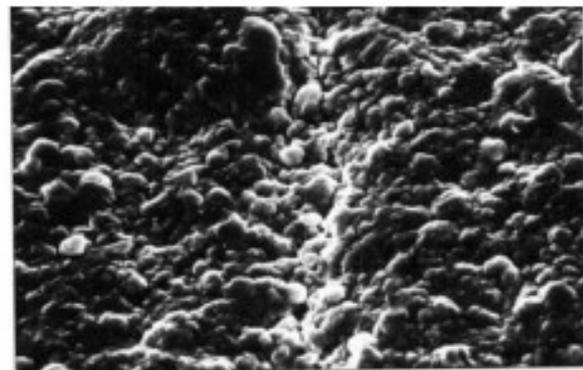


Abbildung 9: Kavitationsverschleiß

Abbildung 10 zeigt nochmals alle Verschleißarten und Verschleißmechanismen und wie sie zusammenhängen.

| Elemente der Systemstruktur | Tribologische Beanspruchung (Symbole) | Verschleißart | Wirksame Mechanismen | | | |
|---|--|-----------------------------------|----------------------|----------|----------------------|---------------------------|
| | | | Adhäsion | Abrasion | Oberflächenzerüttung | Tribochemische Reaktionen |
| Festkörper (1) Zwischenstoff (3) (Hydrodynamik) Festkörper (2) | Gleiten Rollen Wälzen Prallen, Stoßen | --- | | | X | X |
| Festkörper (1) Festkörper (2) (Festkörperreibung, Grenzreibung, Mischreibung) | Gleiten | Gleitverschleiß | X | X | X | X |
| | Rollen Wälzen | Rollverschleiß Wälzverschleiß | X | X | X | X |
| | Prallen Stoßen | Prallverschleiß Stoßverschleiß | X | X | X | X |
| | Oszillieren | Schwingungsverschleiß | X | X | X | X |

| Elemente der Systemstruktur | Tribologische Beanspruchung (Symbole) | Verschleißart | Wirksame Mechanismen | | | |
|--|---------------------------------------|---|----------------------|----------|----------------------|---------------------------|
| | | | Adhäsion | Abrasion | Oberflächenzerüttung | Tribochemische Reaktionen |
| Festkörper (1) Festkörperpartikel (2) | Gleiten | Furchungverschleiß, Erosion | | X | | X |
| Festkörper (1) Festkörper (2) Festkörperpartikel (3) | Gleiten | Kornleitverschleiß, Dreikörperverschleiß | | X | X | X |
| | Wälzen | Kornwälzverschleiß | | X | X | X |
| | Mahlen | Mahlverschleiß | | X | X | X |
| Festkörper (1) Flüssigkeit mit Partikeln (2) | Strömen | Spülverschleiß (Erosionsverschleiß) | | X | X | X |
| Festkörper (1) Gas mit Partikeln (2) | Strömen | Gleitstrahlverschleiß (Erosionsverschleiß) | | X | X | X |
| | Prallen | Prallstrahl-, Schrägstrahlverschleiß | | X | X | X |
| Festkörper (1) Flüssigkeit oder Gas(2) | Strömen Schwingen | Werkstoffkavitation, Kavitationserosion | | | X | X |
| | Stoßen | Tropfenschlag | | | X | X |

Abbildung 10: Zusammenhang: Verschleißart und Verschleißmechanismus

Der Reibungskoeffizient μ beschreibt das Verhältnis von bewegter Masse und aufzuwendender Kraft. Abbildung 11 zeigt skizzenhaft die Grundlage des Reibungskoeffizienten.[7]

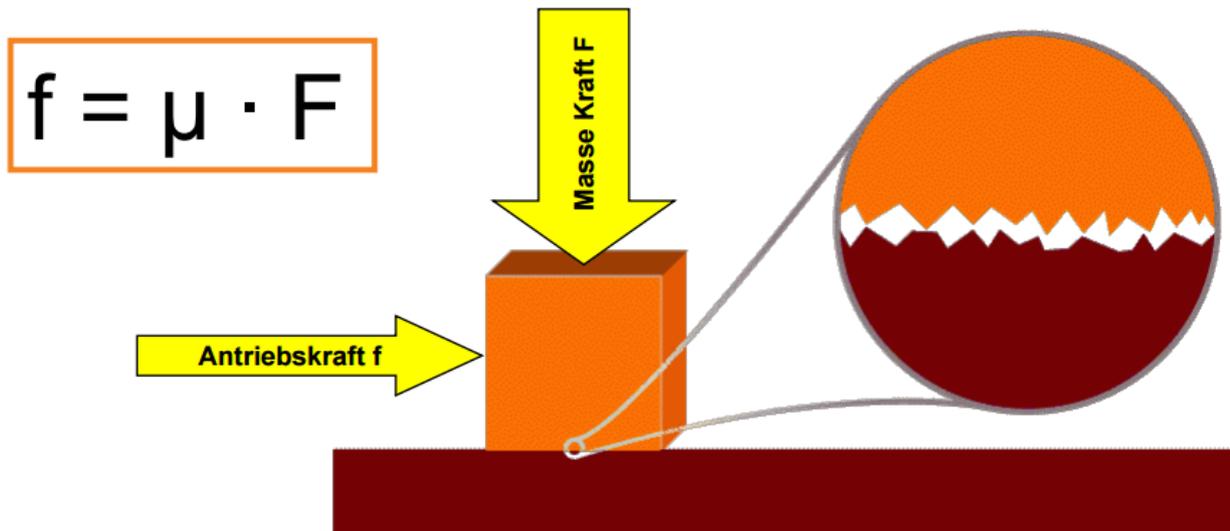


Abbildung 11: Reibungskoeffizient μ

Dabei bedeutet ein niedriger Reibwert bzw. eine niedrige Reibung nicht unbedingt einen niedrigen Verschleiß. Oft ist es sogar umgekehrt. Die Antriebskraft in Abbildung 11 entspricht der Reibungskraft, Die Masse Kraft F der Normalkraft.

Die Reibung äußert sich in Form von Reibwiderstand (Reibungszahl), Oberflächenveränderung (Deformation, Materialverlust, etc.) sowie durch Wärmeerzeugung und Schallemission.

3 Verschleißmindernde Maßnahmen (Stand der Technik)

3.1 Einführung

Dieses Kapitel versucht sich mit der Frage auseinanderzusetzen, wie man den Verschleiß von Maschinenelementen reduzieren kann. Dies ist ein allgemeines Kapitel, das heißt man bezieht sich noch nicht speziell auf die Kette. Abbildung 12, 13, 14 und 15 zeigen nochmals Beispiele zu den Verschleißgrundmechanismen.



Abbildung 12: Adhäsion

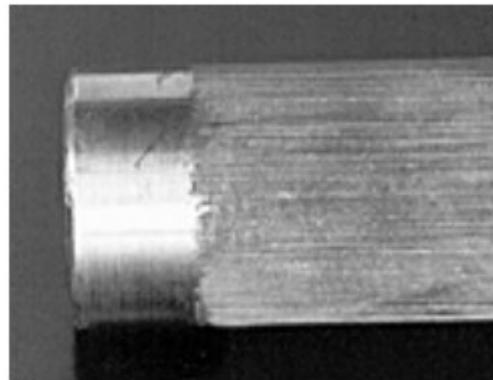


Abbildung 13: Abrasion



Abbildung 15: Oberflächenzerüttung



Abbildung 14: Tribochemische
Reaktion

Es gibt im Allgemeinen vier Hauptarten um den Verschleiß von Werkstoffen zu reduzieren:

- Verschleißbeständige Werkstoffe
- Schmierstoffe
- Oberflächenschutzschichten
- Geometrieverbesserung

Alle Arten haben die Aufgabe den Werkstoff beständiger zu machen, jede Art jedoch auf eine andere Weise. Um Verschleiß zu mindern müssen ein paar Dinge beachtet werden, Abbildung 16 präsentiert diese.

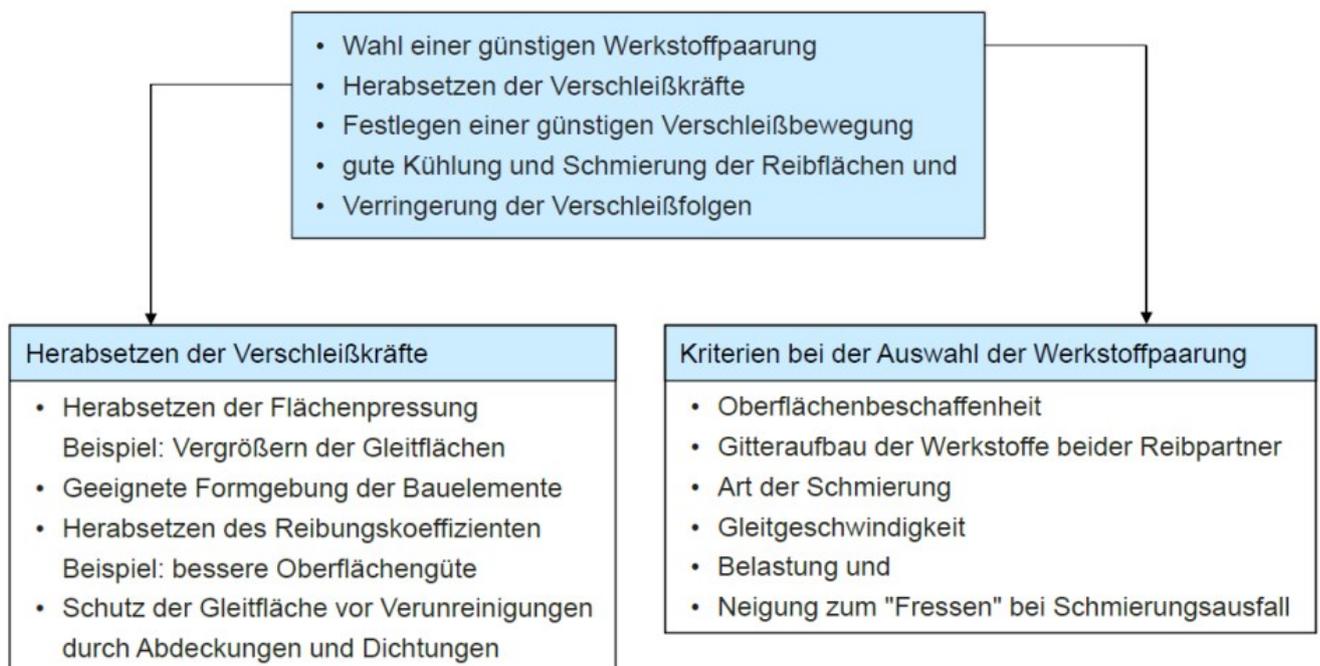


Abbildung 16: Verschleißminderung

3.2 Verschleißminderung bei gegebenen Verschleißmechanismus

Je nachdem welchen Verschleißmechanismus man bei seiner technologischen Einrichtung vorfindet, ergeben sich verschiedene Regeln wie man den Verschleiß senken bzw. entgegenwirken kann.

Abrasion: Der Verschleiß ist nur dann gering, wenn der tribologisch beanspruchte Werkstoff härter als das angreifende Material ist. Für die Werkstoffauswahl gilt demnach

- Härte des beanspruchten Körpers mindestens um den Faktor 1,3 größer als die Härte des Gegenkörpers
- Harte Phasen, z.B. Carbide in zäher Matrix
- Wenn das angreifende Material härter als der Werkstoff ist: zäher Werkstoff[6]

Adhäsion:

- Schmierung
- Vermeiden von Überbeanspruchung, welche zum Durchbrechen des Schmierfilms führen
- Verwendung von Schmierstoffen mit EP-Additiven (extremer Druck)
- Vermeidung von Paarung Metall/Metall: besser: Metall/Kunststoff, Keramik/Metall, Kunststoff/Kunststoff, Keramik/Keramik, Kunststoff/Keramik
- Bei metallischen Paarungen: keine kubisch flächenzentrierten Metalle, sondern kubisch raumzentrierte u. hexagonale Metalle, Werkstoffe mit heterogenem Gefüge[6]

Oberflächenzerrüttung:

- Werkstoffe mit hoher Härte und hoher Zähigkeit (Kompromiss)
- Homogene Werkstoffe (Wälzlagerstähle)
- Druckeigenstressungen in den Oberflächenzonen, z.B. durch Aufkohlen oder Nitrieren[6]

Tribochemische Reaktionen:

- Keine Metalle, höchstens Edelmetalle, stattdessen Kunststoffe und keramische Werkstoffe
- Formschlüssige anstelle kraftschlüssige Verbindungen
- Zwischenstoffe und Umgebungsmedium ohne oxidierende Bestandteile
- Hydrodynamische Schmierung[6]

3.3 Verschleißbeständige Werkstoffe

Durch die hohe Härte dieser Werkstoffe besitzen sie eine recht hohe Verschleißfestigkeit und damit eine höhere Lebensdauer. Für die Härte eines Stahls ist in erster Linie das Eisencarbid (Fe_3C) zuständig. In den meisten, vor allem den legierten Stählen befinden sich aber weitere Karbidbildner, zu denen vor allem Chrom, Molybdän, Vanadium, Niob und Titan gehören.

Sowohl das Eisencarbid kann mit anderen Carbiden Doppelcarbide bilden, wie auch die anderen Carbide sich untereinander mischen und ihrerseits mit Eisencarbid neue Komplexcarbide hervorbringen können. Normalerweise soll in einem Stahl bei allen Temperaturen ein Gleichgewicht bestehen. Dieses Gleichgewicht wird aber im Einsatz oftmals gestört, vor allem durch nur kurzzeitige Erwärmung, so dass der Gleichgewichtszustand außer Kontrolle gerät. Wie sich diese außerordentlich komplizierten Zusammenhänge letztlich auswirken, bleibt vielfach unerkannt.[9]

Das Grundgefüge besteht je nach chemischer Zusammensetzung aus Ferrit, Perlit, Bainit, Austenit oder Martensit.

3.3.1 Verschleißverbesserte Legierungselemente und Werkstoffe

Die durch die metallurgische Erzeugung absichtlich zugegebenen Legierungselemente und die verbliebenen Begleitelemente beeinflussen die Eigenschaften des Basismetalls Eisen. Neben dem Einfluss auf die Gleichgewichtstemperaturen und das Umwandlungsverhalten werden Gebrauchs- und Verarbeitungseigenschaften eingestellt.

Die mechanischen Eigenschaften, wie die Härte, Streckgrenze, Festigkeit und Zähigkeit können infolge der unterschiedlichen Einflüsse der Legierungselemente durch alle festigungssteigernden Mechanismen gezielt modifiziert werden. Elektrische und thermische Anforderungen an den Werkstoff Stahl sowie hohe Beständigkeit gegen Materialabtrag durch Verschleiß und chemische oder thermische Korrosion sind durch geeignete Legierungsmaßnahmen zu erfüllen. Bei den Legierungselementen ist grundsätzlich zu unterscheiden, ob sie Karbid-, Austenit oder Ferritbildner sind bzw. zu welchem Zweck sie dem Stahl zulegiert werden. Die Legierungselemente im Stahl bringen nur die Voraussetzungen für die vom Kunden gewünschten Eigenschaften, doch erst die weitere Verarbeitung und Wärmebehandlung garantiert den Erfolg.

Legierungselemente um den Verschleiß zu vermindern:

Kohlenstoff

Zum einen senkt Kohlenstoff als Legierungselement in Eisen den Schmelzpunkt, während er durch Fe_3C -Bildung die Härte und Zugfestigkeit des Stahles erhöht. Wogegen hin seine Dehnung, Schmiedbarkeit, Schweißbarkeit und Bearbeitbarkeit (durch spanabhebende Werkzeuge) verringert werden. Der Korrosionswiderstand gegenüber Wasser, Säuren und heißen Gasen wird durch den Kohlenstoff praktisch nicht beeinflusst. Stahl lässt sich erst ab einem Kohlenstoffgehalt von 0,3% härten.[56][58]

Silizium

Bei der Entwicklung der Werkzeugstähle spielte die Verbesserung der Härtebarkeit durch Silizium eine wesentliche Rolle. Diese Werkzeugstähle zeichnen sich durch gute Verschleißfestigkeit und Anlassbeständigkeit aus, außerdem erhöht es die Festigkeit.[56][58]

Mangan

Der wichtigste austenitische Manganstahl ist der "Manganhartstahl" mit 12 bis 14% Mangan und 1,2 bis 1,4% Kohlenstoff. Er zeichnet sich durch hohen Verschleißwiderstand, geringe Härte, niedrige Streckgrenze und hohe Verfestigung durch Kaltverformung infolge einer örtlichen Umwandlung von Austenit in Martensit durch Kaltverformung aus. Mangan wirkt sich günstig auf die Schmiedbarkeit, Festigkeit und Schweißbarkeit aus und vergrößert stark die Einhärtetiefe. Solche Stähle erhalten unter schlagender Beanspruchung der Oberfläche eine sehr hohe Kaltverfestigung, während der Kern zäh bleibt; sie sind deshalb bei Schlageinwirkung hochverschleißfest. [56][58]

Molybdän

Molybdän verbessert in Eisen-Legierung die Härbarkeit, Zugfestigkeit und Schweißbarkeit. Aus seiner Eigenschaft Karbide zu bilden ergibt sich eine Erhöhung der Verschleißfestigkeit und Anlassbeständigkeit. daher wird Molybdän in niedriglegierten Warmarbeitsstählen verwendet. In Einsatzstählen bewirkt Molybdän eine geringe Erhöhung der Eindringtiefe des Kohlenstoffs und führt zu einer Steigerung des Randkohlenstoffgehaltes. Austenitischen Stählen wird Molybdän zur Verbesserung der Korrosions- und Warmfestigkeit zulegiert. Ähnlich wie Chrom und Nickel neigt auch Molybdän zur Passivierung. [56][58]

Wolfram

Wolfram ist ein sehr starker Karbidbildner zumal es das Austenitgebiet einengt (Ferritbildner). Es erhöht die Warmfestigkeit, Anlassbeständigkeit und die Verschleißfestigkeit bei hohen Temperaturen bis hin zur Rotglut. Die Zugfestigkeit, Streckgrenze und Zähigkeit wird durch Wolfram ebenso erhöht. Daher wird es als Zusatz bei Schnellarbeitsstahl und Warmarbeitsstahl verwendet. [56][58]

Chrom

Durch Herabsetzung der für die Martensitbildung erforderlichen kritischen Abkühlgeschwindigkeit erhöht es die Härtebarkeit und verbessert damit die Vergütbarkeit. Die Kerbschlagzähigkeit wird jedoch verringert, setzt die Dehnung aber nur sehr wenig herab. Die Schweißbarkeit nimmt bei reinen Chromstählen mit zunehmendem Chrom-Gehalt ab. Die Zugfestigkeit des Stahls steigt um die 80-100 N/mm² je 1% Chrom. Chrom ist Karbidbildner. Seine Karbide steigern Schmitthaltigkeit und Verschleißfestigkeit. [56][58]

Vanadium

Dieses Element ist ein starker Karbidbildner. Vanadium bindet Stickstoff und ergibt eine feinkörnige Gussstruktur. Es erhöht den Verschleißwiderstand durch harte Karbide, sowie die Warmfestigkeit und Anlassbeständigkeit. Vanadium wird daher zu Schnellarbeitsstahl, Warmarbeitsstahl und Hochwarmfesten-Stahl hinzulegiert. [56][58]

Phosphor

Phosphor erhöht in Eisen-Legierungen die Zugfestigkeit, Härte und Korrosionsbeständigkeit. [58]

Kobalt

Wird als Legierungselement nur in Verbindung mit anderen Elementen wie Chrom und Wolfram verwendet. Es erhöht die Warmhärte und die Verschleißfestigkeit bei Schnellarbeitsstählen. Kobalt bildet keine Karbide und hemmt das Kornwachstum bei höheren Temperaturen. [56][58]

Verschleißbeständige Werkstoffe:

Werkzeugstähle

Erhöhung der Verschleißfestigkeit und der Anlassbeständigkeit[56][57]

Beispiele: 125 CrSi 5, 45 SiCrV 6

Kaltarbeitsstähle

Erhöhung des Verschleißwiderstandes durch Karbidausscheidungen[56][57]

Beispiel: 105 WCr 6, X 210 CrW 6

Schnellarbeitsstähle

Erhöhung der Warmhärte, der Anlassbeständigkeit und der Verschleißfestigkeit durch Sonderkarbidausscheidungen[56][57]

Beispiel: HS¹ 2-9-1, HS 18-1-2-5

Warmarbeitsstähle

Steigerung der Härte, Erhöhung des Verschleißwiderstandes und Verbesserung der Anlassbeständigkeit[56][57]

Beispiel: X 40 CrMoV 5-1

Nitrierstähle

Erhöhung der Härte der Nitrierschicht und des Verschleißwiderstandes. [56][57]

0,31 - 0,41 %-C, legiert mit den Nitridbildnern Al, Cr, Ti, etc.

Beispiel: 34 CrAl 6; 41 CrAlMo 7

Einsatzstähle

Einsatzstähle besitzen im Inneren eine hohe Zähigkeit und auf der Oberfläche eine hohe Härte und somit eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen Verschleiß.
[56][57]

Beispiele: 17CrNiMo6, 16MnCr5 (Euronorm: EC80)

¹ Highspeed Steel

Abbildung 17 demonstriert verschleißbeständige Stähle- bzw. Stahlgussarten.

| Werkstoff | Beispiele | Anwendung |
|--|--|---|
| Vergütungsstahl bzw. Vergütungsstahlguss | 34CrNiMo6 42CrMo4 50Mn7 | ● Schmirgelder Verschleiß ● Mittlere Schlagbeanspruchung |
| Höherfeste Stähle bzw. Stahlguss | 22NiMoCr5-6 G22NiMoCr5-6 | ● Schmirgelder Verschleiß ● Mittlere Schlagbeanspruchung |
| Legierte Kaltarbeitsstähle | 145V33 X38CrMoV5-1 X40CrMoV5-1 X155CrVMo12-1 X165CrMoV12 | ● Schmirgelder Verschleiß ● Mittlere Schlagbeanspruchung |
| Warmarbeitsstähle | 56NiCrMoV7 | ● Schmirgelder Verschleiß ● Mittlere Schlagbeanspruchung |
| Schnellarbeitsstähle | HS12-1-4-5 HS10-4-3-10 | ● Schmirgelder Verschleiß ● Mittlere Schlagbeanspruchung |
| Manganhartstähle | X120 Mn12 X110 Mn14 X90 Mn18 | ● Geringer schmirgelder Verschleiß ● Hohe Druck- und Schlagbeanspruchung |

Abbildung 17: Verschleißbeständige Stähle bzw. Stahlgussarten

3.4 Schmierstoffe

An dieser Stelle wird gleich vorweggenommen das die Schmierstoffe in dieser Arbeit nur angestreift werden, da sich diese Arbeit als Hauptaugenmerk auf die Verschleißminderung von Ketten spezialisiert und sich dort weder Schmieröle noch Schmierfette oder andere Schmierstoffe zur Verschleißminderung eignen. Abbildung 18 gibt einen Überblick über mögliche Schmierstoffe.

- Schmieröle*
 - Mineralöle (unlegierte oder legierte Öle): die meisten Schmierstoffe besitzen Mineralölbasis
 - synthetische Flüssigkeiten (unlegierte oder legierte Flüssigkeiten)
- Schmierfette*
 - Fette mit Seifenverdickern (Fette mit Mineralöl oder synthetischen Flüssigkeiten als flüssige Phase mit Schmierwirkung)
 - Fette mit Nichtseifenverdickern (Fette mit Mineralöl oder synthetischen Flüssigkeiten als flüssige Phase mit Schmierwirkung)
- Festschmierstoffe*
 - Trockenpulver (z. B. Graphit, MoS₂), weiche Metalle (z. B. Pb, Cu, Au)
 - Gleitlacke
 - Pasten
 - Polymere (z. B. PTFE)
- Haftschmierstoffe*
 - Sprühhaftschmierstoffe mit Festschmierstoffen
 - bitumenhaltige Schmierstoffe
- Emulsionen*
 - Öl-in-Wasser-Emulsionen
 - Wasser-in-Öl-Emulsionen
- sonstige Schmierstoffe*
 - Flüssigkeiten, wie Wasser, flüssige Metalle, Säuren, Laugen
 - Gase, z. B. Luft-Stickstoff, Kohlendioxid, Helium

Abbildung 18: Schmierstoffe

Schmierung:

Schmierung ist die Verringerung von Reibung und Verschleiß zwischen zwei Maschinenelementen („Reibpartnern“), die sich relativ zueinander bewegen. Dies geschieht durch den Einsatz eines geeigneten Schmierstoffes und Schmierverfahren in der Tribologie.[10]

Umwandlung der äußeren Reibung in eine günstigere innere Reibung durch einen Schmierstoff.

Nachteile:

- unsauber, Schmutz bleibt kleben
- Wartung - Schmierung muss in regelmäßigen Abständen erneuert werden
- nicht überall anwendbar (z.B. Lebensmittelproduktion...)
- anfallen von umweltschädlichen Altemulsionen

Die Hauptaufgabe der Schmierstoffe ist die Kraftübertragung. Weitere Aufgaben sind die Wärmeabfuhr, Abdichtung und der Korrosionsschutz. Als Basis der Schmierstoffe dienen in den häufigsten Fällen Mineralöle oder Syntheseöle. [8]

3.5 Oberflächenschutzschichten bzw. Verfestigungsverfahren

Die wichtigste Methode um den Verschleiß zu minimieren neben der Tatsache das man schon einen verschleißbeständigen Werkstoff angewendet hat, ist das Verwenden von materialverfestigenden Verfahren. In diesem Kapitel werden viele Verfahren vorgestellt, wobei wiederum wie auch in den vorangegangenen Kapiteln noch keine Einschränkung auf die Kette vorgenommen werden.

Jede Oberfläche ist das Ergebnis eines Fertigungsprozesses. Das zu ihrer Herstellung angewendete Verfahren wirkt sich dabei nicht nur auf die geometrische Gestalt aus, sondern beeinflusst zugleich die chemische und physikalische Beschaffenheit der Randzone. Jede Eigenschaft, jeder Tiefenbereich einer Oberfläche beeinflusst deren Eigenschaften. Das bedeutet für die Praxis: Die Oberflächentechnik ist immer eine Randschichttechnik. [12]

Technische Oberflächen haben immer eine Funktion, die grundsätzlich anders sein kann, als die des restlichen Werkstoffs:

- Der Grundwerkstoff bestimmt die äußere Form, das Gewicht und z.B. die Festigkeit.
- Die Oberfläche hat eine andere Funktion. Man spricht daher auch von einer funktionellen Oberfläche.

Die Oberflächentechnik hat die Aufgabe, die Funktionen eines Bauteils und seiner Oberfläche zu trennen.

Abbildung 19 deutet auf die Schwerpunkte der Oberflächentechnik hin. Zu jedem dieser Schwerpunkte gehört eine Vielzahl unterschiedlichster Technologien und zu jeder Technologie gehören Methoden der Vor- und eventuellen Nachbehandlung. Jede für sich ist wiederum ein eigenständiges Verfahren. [12]

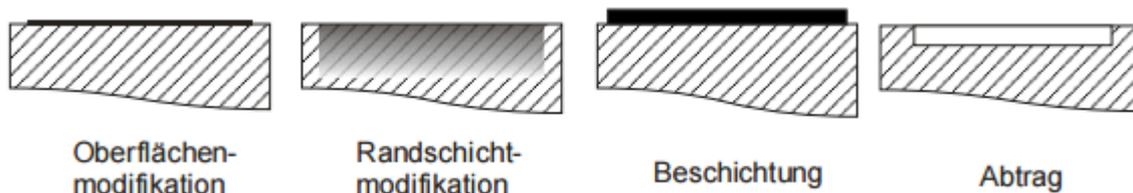


Abbildung 19: Schwerpunkte der Oberflächentechnik

Je nachdem von welchem Bauteil und welcher Umgebung ich ausgehe und zudem noch welche Verschleißart ich bei meiner Maschine vorfinde, gibt es verschiedene Verfahren. Abbildung 20 zeigt ein solches Schemata.

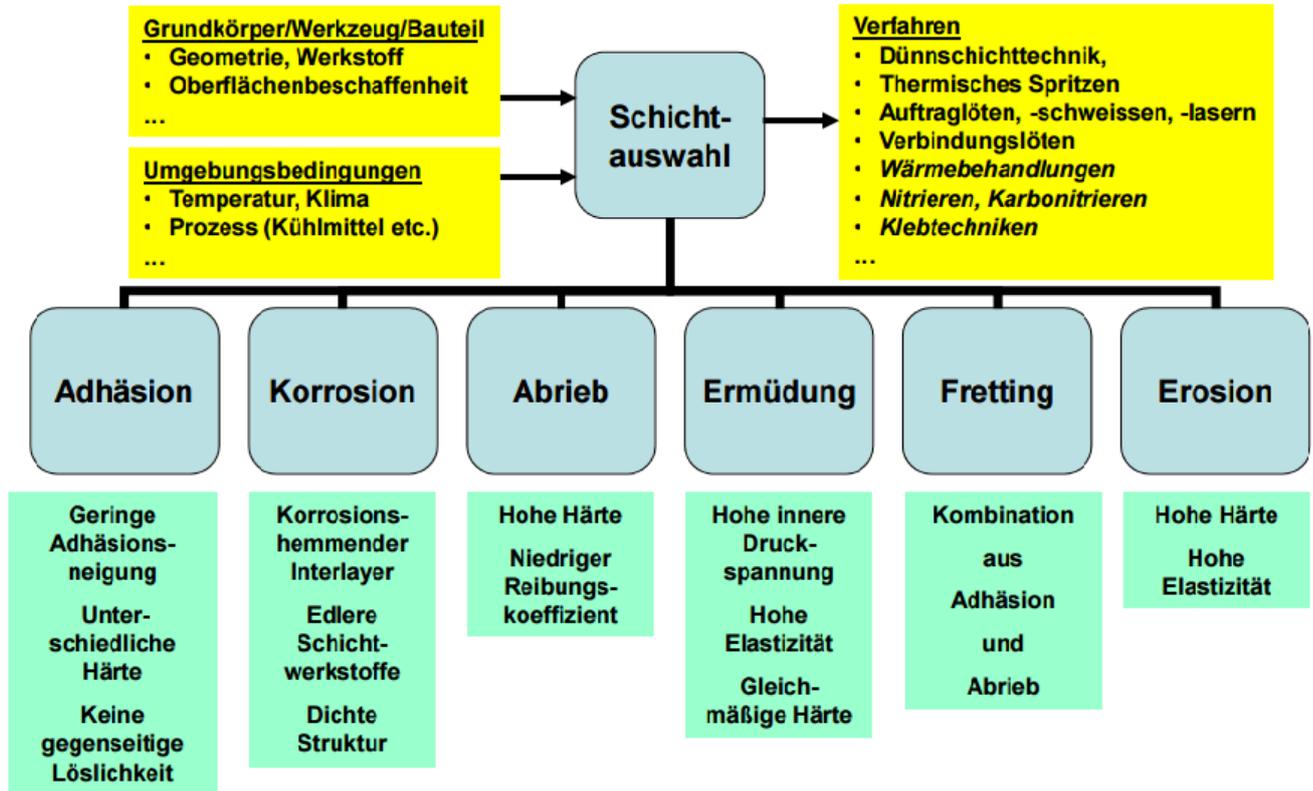


Abbildung 20: Verfahrensauswahlparameter

3.5.1 Mechanische Oberflächenverfestigung

Mechanische Oberflächenbehandlungen, beispielsweise Festwalzen, Kugelstrahlen oder Laserschockbehandlung, sind sehr effektive Verfahren zur Erhöhung des Werkstoffwiderstandes gegen Verschleiß, Spannungsrisskorrosion und insbesondere zur Steigerung der Schwingfestigkeit in einer Vielzahl technischer Anwendungen. Durch mechanische Oberflächenverfestigungsverfahren ist es möglich, oberflächennahe Druckeigenspannungs- und Verfestigungszustände in das Bauteil einzubringen und somit die Randschicht lokal zu verstärken.[13]

3.5.1.1 Kugelstrahlen

Nach DIN 8200 wird unter Strahlen ein Fertigungsverfahren verstanden, bei dem ein meist kugelförmiges Strahlmittel (Werkzeug) in Strahlgeräten unterschiedlicher Strahlsysteme beschleunigt und zum Aufprall auf die zu bearbeitende Oberfläche eines Strahlguts (Werkstück) gebracht wird. Es ist ein Kaltbearbeitungsverfahren. Jede Kugel, die das Werkstück trifft, wirkt dabei wie ein winziger Schmiedehammer, der eine flache Kalotte auf der Oberfläche hinterlässt. Damit eine Kalotte entstehen kann, muss die Metalloberflächenschicht gedehnt werden, die tiefer liegenden Werkstoffschichten dagegen versuchen die Oberfläche wieder in den Ursprungszustand zurückzubringen. Dabei wird unter der Kalotte ein Bereich kaltverformten Werkstoffes mit einer hohen Druckeigenspannung erzeugt. Es wird beim Auftreffen des Strahlmittels auf dem Strahlgut die kinetische Energie insbesondere in elastisch-plastische Verformungsarbeit umgesetzt. Folgende Prozessparameter spielen hierbei eine Rolle und beeinflussen das Strahlergebnis und damit den Randschichtzustand: das Strahlmittel, bestimmt durch Form und Härte die Strahlmittelauftreffgeschwindigkeit, der Strahlabstand, der Strahlauftrittswinkel, der Strahlmitteldurchsatz, der Strahlmittelbedeckungsgrad, der spezifische Strahlmittelbedeckungsgrad und die Strahleinwirkdauer.[15]

Das Hauptziel dieses Verfahrens besteht in der Randschichtverfestigung bei gleichzeitiger Erzeugung von oberflächennahen Druckeigenspannungen (Abbildung 21,22) in einer Tiefe von 0,2 bis 0,5mm, um die Schwingfestigkeit, Verschleißbeständigkeit oder Korrosionsbeständigkeit zu verbessern. Ein unerwünschter Nebeneffekt des Verfestigungsstrahlens ist die meist erhöhte Oberflächenrauheit bzw. kann durch eine falsche Prozessführung (z. B. zu hoher Druck, zu geringer Abstand vom Strahlgut) eine Schwächung des Bauteils hervorgerufen werden. [15]

Das Kugelstrahlen ist ein sehr flexibles Oberflächennachbehandlungsverfahren, da es sich an Bauteilen mit beliebigen Abmessungen und beliebiger Geometrie mit Kerbstellen wie Querschnittsübergänge, Hohlkehlen, Bohrungen anwenden lässt.

Beim Verfestigungsstrahlen können durch massive oberflächennahe Umformung sowohl Formänderungen, Topographieänderungen, Erzeugung und Änderungen von Gitterstrukturen, Erzeugung und Änderungen des Markoeigenzustandes, Änderungen der Phasenanteile und Texturzustände als auch Risserzeugung und Dichteänderungen auftreten. Aufgrund der komplexen Strahlanlagen ist eine wirtschaftliche Anwendung nur an Bauteilen mit Serienfertigung sinnvoll. [15]

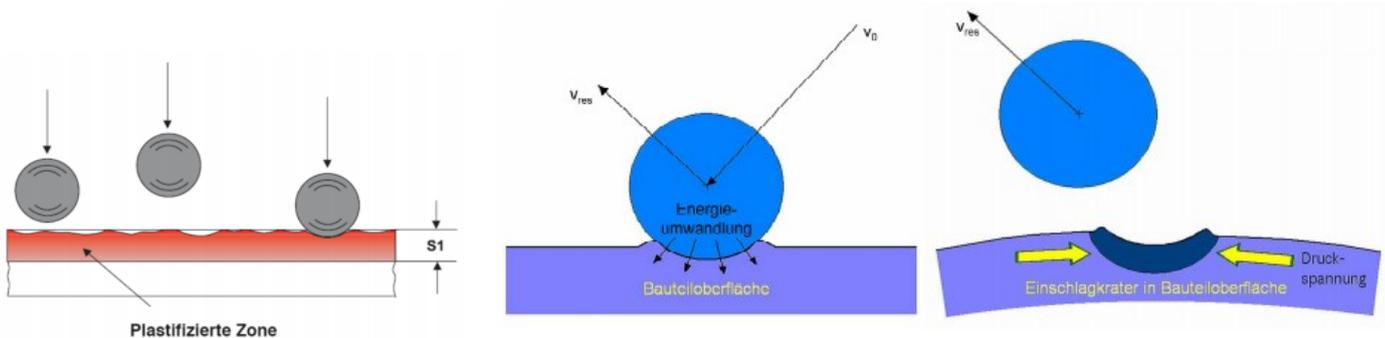


Abbildung 21: Entstehung der Druckeigenstressungen

Vorteile:

- Hohe Druckspannung von rund 1.38 MPa oder darüber wirken sich außerordentlich günstig auf das Ermüdungsverhalten aus
- Unregelmäßigkeiten beim Einsatzhärten wie Randoxidation werden durch das Kugelstrahlen in der Wirkung gemildert

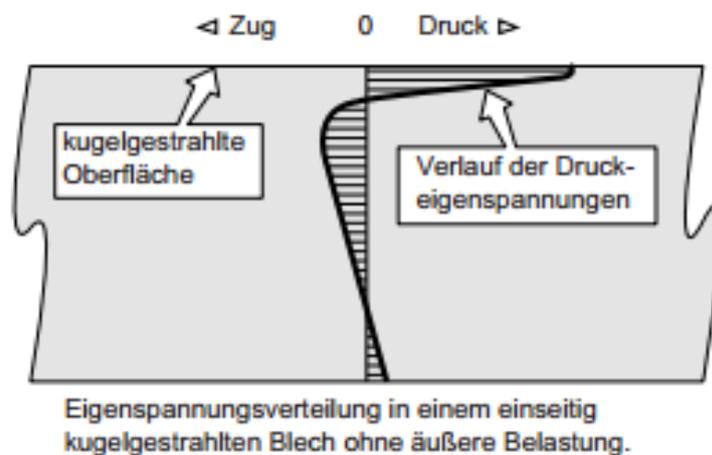


Abbildung 22: einseitig kugelgestrahlte Oberfläche; Spannungsverteilung

Almen-Verfahren:

Bei diesem Verfahren werden sogenannte Almen-Plättchen mit den gleichen Strahlbedingungen wie später das Strahlgut behandelt, mit der Ausnahme der Strahlzeit. Es werden verschiedene Almenplättchen auf einem Halter mit unterschiedlichen Strahlzeiten kugelgestrahlt. Bei der anschließenden Demontage des Almenplättchens vom Halter biegt sich das Plättchen aufgrund der eingebrachten Druckeigenspannung konvex zur bestrahlten Oberfläche durch. Die sich ergebende Krümmung bzw. die Durchbiegung bei den genormten Plättchen wird vermessen und über der Strahlzeit aufgetragen. Die so ermittelte Almenintensität ist ein Maß für die in das Bauteil eingebrachte Energie des Strahlmittelstroms. [13]

3.5.2 Thermische Verfestigungsverfahren

3.5.2.1 Induktionshärten

Das Induktionshärten oder auch Randschichthärten bietet eine optimale Möglichkeit, Bauteile lediglich in Teilbereichen zu härten (partielles Härten). Hierbei werden die zu härtenden Bereiche mit Hilfe eines Induktors durch Induktionsstrom partiell über eine gewisse Zeit erhitzt. Die Abschreckung erfolgt durch eine Wasserbrause direkt im Anschluss, kann aber gegebenenfalls auch entfallen. Durch das rasche Abkühlen erfolgt eine Austenit-Martensit Umwandlung. Martensit ist äußerst verschleißfest. [19]

Es handelt sich hierbei um ein äußerst präzises Verfahren, welches sich sehr genau steuern lässt um die gewünschte Härte in der Randschicht des Bauteils zu erreichen. [19]

Für das Induktivhärten eignen sich ausschließlich Werkstoffe mit einem Kohlenstoffgehalt über 0,3%. Materialien mit einem geringeren Kohlenstoffgehalt können jedoch bei Bedarf vor dem Induktionshärten aufgekühlt werden.[19] Bei Gusseisen sollte der gebundene Kohlenstoffanteil mindestens 0,4% betragen.[20]

Es wird mit einem spulenförmigen Leiter aus Kupfer, der so genannten Arbeitsspule, ein elektromagnetisches Feld erzeugt. In dieses Feld wird nun das Werkstück gebracht. Durch das entstehende Wechselfeld wird in das Metall eine elektrische Spannung induziert, welche ihrerseits einen Strom erzeugt. Dieser Strom verursacht eine Wärmeentwicklung, weil ja bekanntlich jedes Metall einen elektrischen Widerstand besitzt. So wird das Werkstück auf Härtetemperatur ($>768^{\circ}\text{C}$, Curiepunkt) erwärmt. Je höher die Frequenz und die Leistung desto tiefer ist die Einhärtetiefe. Nach der Erwärmung wird es mit einer Wasserbrause abgeschreckt. [20]

Härtefehler treten dann auf, wenn der Induktor nicht mit der Form und Lage des Werkstückes übereinstimmt. Die Folgen sind unregelmäßige Härte und möglicherweise Risse am Werkstück. Meistens liegen die Fehler aber in der Konstruktion, wie ungleiche Querschnitte, die zu Verzug führen, oder scharfe Kanten, die Anschmelzungen zur Folge haben. [20]

Abbildung 23 zeigt den schematischen Aufbau der Induktionshärtung.

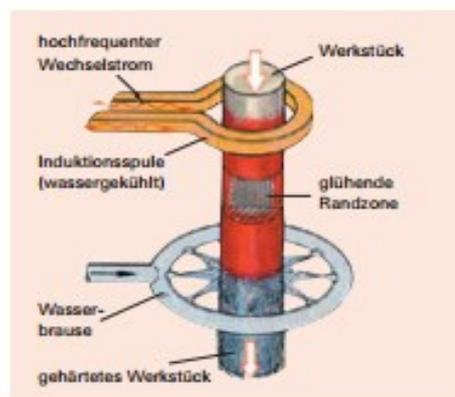


Abbildung 23: Induktionshärten

Vorteile:

- Infolge der Induktion entsteht eine hohe Oberflächenhärte mit einer hohen Einsatzhärtetiefe, die dem Bauteil einen hohen Widerstand gegen extreme Belastungen verleiht. Weicher Kern und eine extrem harte Außenschicht verbessern den Ermüdungswiderstand
- Erhöhte Verschleißbeständigkeit

- Erhöhte Biegewechselfestigkeit
- geringer Verzug
- Hohe Leistungsdichte sorgt für eine schnelle Erwärmung
- Kontrolle der beheizten Tiefe
- Vollständige Kontrolle von Zeit, Kraft und Härtetemperatur
- Hitze beschränkt sich auf ausgewählte Bereiche

Nachteile:

- Hohe Anlagenkosten
- Schwer erreichbare Stellen schwer zu Härten
- Gusseisen darf beim Induktionshärten nicht mehr als 3% C, 2% Si und 0,1% Ph enthalten

3.5.2.2 Flammhärten

Ähnlich wie beim Induktivhärten wird beim Flammhärten die Randschicht mit starken Brennerflammen rasch auf Härtetemperatur erwärmt und mit einer Wasserbrause abgeschreckt. Dazu führt man die hintereinander angeordneten Heizflammen und Wasserbrasen langsam über das Werkstück. Die Tiefe der gehärteten Randschicht kann durch die Vorschubgeschwindigkeit des Brenners eingestellt werden. Der Abstand zwischen Brenner und Brause bestimmt die Haltezeit, diese beeinflusst auch die Härte. Die Form des Brenners und der Brause sind der Werkstückform angepasst. Im Vergleich zu den anderen Randschichthärteverfahren, wird beim Flammhärten relativ wenig Energie pro Zeiteinheit in die Oberfläche eingebracht. Aus diesem Grund erzielt man sehr große Einhärtetiefen. Härtetemperatur und Abkühlgeschwindigkeit sind von der Stahllegierung und dem gewünschten Härtegrad abhängig. [21] Zum Flammhärten werden sowohl normale Schweißbrenner als auch spezielle Acetylen-Sauerstoff-Hochleistungsbrenner eingesetzt.[22]

Als Brenngase kommen Gemische aus Sauerstoff (O₂) und Kohlenwasserstoffen wie Methan (CH₄), Acetylen (C₂H₂) oder Propan (C₃H₈) zur Anwendung. [23]

Beim Flammhärten werden an Bauteilen mit zähem Kern hohe Oberflächenhärten mit bis zu ca. 800 HV erzielt. Voraussetzung dafür sind Werkstoffe, die bereits im Ursprungszustand einen Mindestkohlengehalt von 0,4 - 0,6 % besitzen.[21]

Die Erwärmung zum Austenitisieren erfolgt in erster Linie durch Strahlungswärme, welche aus der Verbrennung von Erdgas in Verbindung mit technisch reinem Sauerstoff entsteht, hinzu kommt noch die Wärmeleitung. Nach der Austenitisierung erfolgt die Abschreckung je nach Härteverfahren und Werkstoff mit Wasser, speziellem Härteöl, synthetischem Abschreckmittel oder Pressluft. Bei der Flammhärtung werden in der Regel nur die einem besonderen Verschleiß unterworfenen Teilflächen eines Bauteiles gehärtet. Wobei durch die im randnahen Bereich induzierten Druckspannungen auch noch die Dauer- und Wälzfestigkeit erhöht wird.[21]

Vorteile:

- Relativ geringe Maß- und Formveränderungen
- Große Randhärte-tiefen
- Es können kleinere Bauteile mit geringer Einhärtetiefe gehärtet werden
- große, sperrige Bauteile können gehärtet werden
- Flexibel (kein Induktor)
- wirtschaftlich
- geringer Energiebedarf

Abbildung 24 zeigt den Vorgang des Flammhärtens.

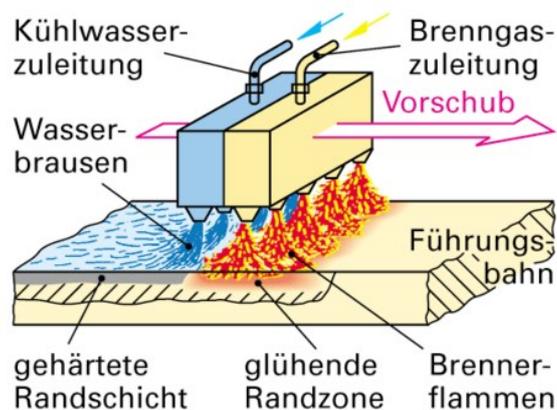


Abbildung 24: Flammhärten

3.5.2.3 Laserstrahlhärten

Beim Laserstrahlhärten handelt es sich um ein Randschichthärteverfahren. Ähnlich wie das Flamm- und Induktionshärten, nur deutlich effektiver und moderner.[25] Das Laserhärten ist ein Prozess, bei dem der Energieeintrag mittels Strahlung direkt auf die Bauteiloberfläche erfolgt. Dabei wird der Laserstrahl mit einstellbarer Brennfleckgröße mittels einer CNC-gesteuerten Mehrachsenanlage oder eines Roboters über die hochbelasteten Funktionsflächen geführt, die sich dabei über die Austenitisierungstemperatur (Härtetemperatur) erwärmen.[25] Dies führt zu einer Homogenisierung der Kohlenstoffverteilung und damit zur Ausbreitung einer Austenitisierungsfront im Material. Weil praktisch fast gleichzeitig die Selbstabschreckung erfolgt, reduzieren sich Verzüge effizient.[24]

Je nach verwendetem Material liegt die Austenitisierungstemperatur bei ca. 900 °C bis 1400 °C und die Haltezeit bei ca. 3 s bis 10 s. Infolge des geringen Wärmemengeneintrags und der schnellen Wärmeableitung über das Bauteil wird eine Selbstabschreckung erreicht, wodurch ein "Einfrieren" des Härtegefüges bewirkt wird. Der Einsatz zusätzlichen Medien zur Abschreckung, wie Wasser, Öl oder Druckluft, ist nicht erforderlich.[24] Es bildet sich ein sehr feinkörniger, zäher Martensit. Durch die gleichmäßige Abkühlung von innen nach außen entstehen wesentlich weniger Spannungen. Da damit auch wesentlich weniger Rissgefahr als bei anderen Randschichthärteverfahren besteht, ist kein nachträgliches Anlassen des Werkstücks erforderlich. Die Zähigkeit des Grundwerkstoffs bleibt auch nach dem Härten erhalten.[26]

Als Laser verwendet man CO₂-Gaslaser oder in jüngster Zeit auch Hochleistungs-Diodenlaser oder auch Faserlaser.

Die Prozessparameter müssen derartig gewählt werden, dass

- das Material nicht aufgeschmolzen wird
- aber genügend Wärme in das Bauteil eindringt (Wärmeleitung) um die geforderte Härtetiefe zu erreichen.[26]

Vorteile:

- einsetzbar für alle härtbaren Stähle mit ausreichend Kohlenstoff
- Härtespurbreite von 1 bis 50 mm in Abhängigkeit der verwendeten Optik und der maximalen Laserausgangsleistung
- Einhärtetiefe materialabhängig bis max. 1,5 mm
- verzugsarm durch punktuellen, hohen Energieeintrag bei extrem kurzer Verweildauer, daraus ergibt sich eine Verringerung bzw. Einsparung von Nacharbeit
- Härtetemperatur der Werkstückoberfläche bis zu +/- 10°K regelbar
- Beanspruchungsgerechtes selektives Härten einzelner Werkstückoberflächen. Es entsteht eine bereichsweise harte Oberfläche mit zähem Kern und unbeeinflussten Bereichen in direkter Umgebung
- zusätzliche Medien zur Abschreckung, wie Wasser und Gas entfallen.
- kurze Behandlungszeiten
- reduzierter Verzug
- Härten von komplexen Geometrien möglich
- hohe Flexibilität, da keine Induktoren nötig sind
- starke Erhöhung der Verschleißfestigkeit

Abbildung 25 das Schema des Laserstrahlhärtens.

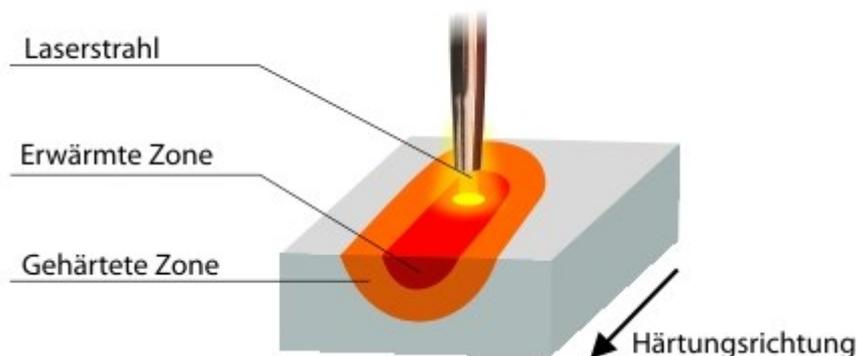


Abbildung 25: Schema zum Laserstrahlhärten

3.5.2.4 Vor- und Nachteile der thermischen Härteverfahren

Abbildung 26 gibt nochmals einen Überblick der Vorteile und auch der Nachteile im Hinblick auf das Induktionshärten, das Flammhärten sowie das Laserhärten.

| Flammhärten | Induktionshärten | Laserhärten |
|---|--|---|
| | + hoher Automatisierungsgrad | |
| <ul style="list-style-type: none"> + für große Bauteile geeignet + große Einhärtetiefen realisierbar + geringe Anlagenkosten | <ul style="list-style-type: none"> + kurze Austenitisierungszeit (hohe Leistungsübertragung) + Geringe Verzunderung + Geringer Verzug + Gute Reproduzierbarkeit + Partielle Härtung | <ul style="list-style-type: none"> + Sehr hohe Härten erzielbar + Kein zusätzliches Abschrecken + Geringer Verzug + Extrem kurze Behandlungszeiten + Gute Reproduzierbarkeit + Flexibles Härten (Spotform, -größe,...) + Schwer zugängliche Flächen + Partielles/ Selektives Härten |
| <ul style="list-style-type: none"> - Erfordert gut zugängliche Oberflächen - tlw. Verzug der Bauteile | <ul style="list-style-type: none"> - Aufwändige Anlagen und Werkzeuge - Bauteilspezifische Induktoren - Nur bei hohen Stck.zahlen wirtschaftlich | <ul style="list-style-type: none"> - Begrenzte Bauteilgrößen - Laserschutz notwendig |

Abbildung 26: Vor- und Nachteile der thermischen Verfahren im Vergleich

3.5.3 Thermochemische Verfestigungsverfahren

3.5.3.1 Einsatzhärten

Das Einsatzhärten ist das in der Technik am meisten angewendete Verfahren zur Steigerung des Verschleißwiderstandes einer Stahloberfläche. Einsatzhärten nennt man nach DIN 17014 das Aufkohlen, Härten (und Anlassen) eines Werkstücks aus Stahl. Im Allgemeinen wird bis zu einer Tiefe von 1.5 mm und einem Randkohlenstoffgehalt bis 0,8%C aufgekohlt. Ein Einsatzhärten des Werkstückes wird nötig, wenn sowohl ein zäher Kern mit hoher Streckgrenze und Zugfestigkeit, als auch eine verschleißbeständige Randzone des Bauteiles für die späteren Anwendung erforderlich sind. Gleichzeitig werden durch diesen Prozess Druckeigenspannungen in der Randzone aufgebaut, wodurch eine Steigerung der Dauerfestigkeit erreicht werden kann. Eine Abwandlung des Einsatzhärtens ist das Karbonitrieren (siehe Kapitel 3.5.3.3).[29]

Das Einsatzhärten ist ein thermochemischer Prozess. Es besteht in der Regel aus drei Schritten. Im ersten Schritt werden die Werkstücke einer Kohlenstoffumgebung ausgesetzt. Während dieses Prozesses wird die Oberfläche von Werkstücken mit Kohlenstoff (Aufkohlen) angereichert, um die mechanischen Eigenschaften der äußeren Schichten des Werkstücks zu verbessern. Für das Aufkohlen kommen Kammeröfen oder Topföfenanlagen und Durchlaufanlagen zum Einsatz.[30] Bekanntlich ist die Härbarkeit eines Stahles in allererster Linie abhängig von seinem Kohlenstoffgehalt. Ohne Kohlenstoff (C) ist ein Härten und eine Festigkeitssteigerung des Stahls durch Wärmebehandlung nicht möglich. Schon geringe Veränderungen im C-Gehalt verändern die Eigenschaften des Stahls. Je höher der C-Gehalt, desto größer die zu erreichende Härte.[27] Das Aufkohlen erfolgt in der Regel zwischen 880 °C bis 960 °C.[28] Zum Aufkohlen werden die Werkstücke in einem Gas, in flüssigen oder in körnigen, Kohlenstoff enthaltenden Mitteln bei Temperaturen geglüht, bei denen das Stahlgefüge austenitisch ist. In diesem Zustand ist das Lösungsvermögen für Kohlenstoff besonders groß.

Dabei diffundiert Kohlenstoff aus dem Aufkohlungsmittel in die Werkstückrandschicht. Die Behandlungsdauer richtet sich prinzipiell nach der erforderlichen Aufkohlungstiefe (Abbildung 27). Die Kohlenstoffatome sind etwa halb so groß wie die Eisenatome. Das ermöglicht, sie auf Zwischenplätzen des Eisengitters einzulagern. Kohlenstoff besitzt außerdem die Fähigkeit, mit dem Eisen oder den metallischen Legierungselementen wie Chrom, Molybdän, Vanadin u.a. Verbindungen, die Carbide, zu bilden. Das Eisencarbid Fe_3C wird metallkundlich als Zementit bezeichnet. Dabei entstehen auch vielfach Mischcarbide der Form $Fe_xM_yC_z$. Diese haben im Vergleich zu den Eisenmischkristallen Ferrit und Austenit einen völlig anderen Kristallaufbau, sind z.T. sehr schwer löslich und besitzen eine relativ hohe Härte. Zur Regelung des Aufkohlungsprozesses wird der C-Pegel, also der Kohlenstoffpegel² herangezogen. [29]

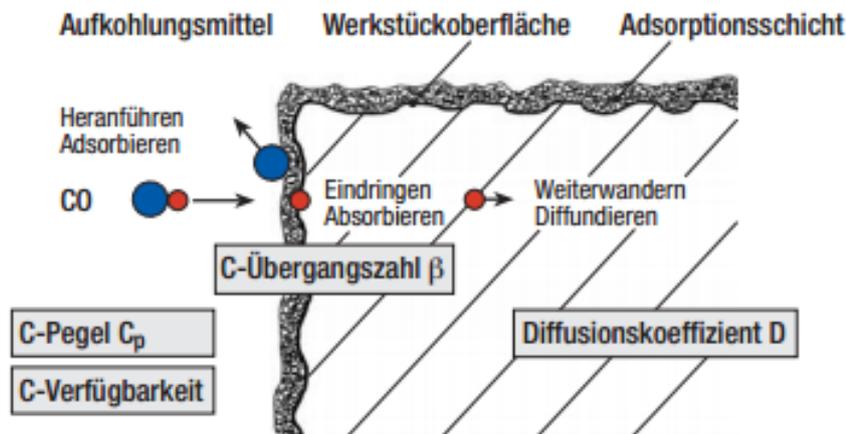


Abbildung 27: Kohlenstoffanreicherung

In der zweiten Phase findet das Abschrecken (Härten) statt. Dies kann direkt nach der Einsatztemperatur oder nach einer Zwischenabkühlung und erneuten Erhitzung auf eine materialspezifische Härtungstemperatur erfolgen. Um Verformungen gering zu halten, ist es ebenfalls möglich, anstelle direkt in kaltem Öl oder Wasser in einem Öl- oder Wärmebad abzuschrecken.[30]

² Kohlenstoffanteil in der Ofenatmosphäre

Der dritte Schritt ist das Anlassen und dient in erster Linie dazu, hohe Spannungen in der Struktur abzubauen und um die Schweiß- und Rissempfindlichkeit zu verringern. Falls gewünscht, ist auch eine Tiefkühlbehandlung möglich. Hierbei wird auf Temperaturen unter null Grad (mindestens -80 °C) mit dem Ziel abgekühlt, den Restaustenitanteil zu verringern und hiermit die Maßstabilität nach dem Härten zu verbessern.[30]

In Frage kommende Stähle sind hauptsächlich die so bezeichneten Einsatzstähle, siehe DIN EN 10084, oder die Automateneinsatzstähle, siehe DIN EN 10087, mit Massenanteilen an Kohlenstoff im Bereich zwischen 0,1 und 0,3%. Sollen Werkstücke aus diesen Stählen durch Härten eine hohe Härte und Festigkeit erhalten, ist es notwendig, sie entsprechend der Gesetzmäßigkeit der Aufhärbarkeit mit einem höheren Kohlenstoffgehalt zu versehen.[29]

Härtevarianten beim Einsatzhärten: (Abbildung 28)

A

Direkthärtung Diese Härtingsart ist die einfachste und wirtschaftlichste. Voraussetzung ist die Verwendung von Feinkorn-Stählen mit geringem Cr-Gehalt.

B

Einfachhärtung. Die durch Abkühlen nach dem Aufkohlen und anschließende Erwärmung auf Härtetemperatur verursachte Gefügeumwandlung ergibt ein feinkörniges Gefüge.

C

Einfachhärtung mit Zwischenglühen. Diese wird dann angewendet, wenn nach dem Aufkohlen noch eine mechanische Bearbeitung stattfindet (Teilhärtung).

D

Einfachhärtung mit isothermischen Zwischenglühung. Sie wird für Stähle angewendet, die nicht zur Direkthärtung geeignet sind und zu Rissbildung neigen.

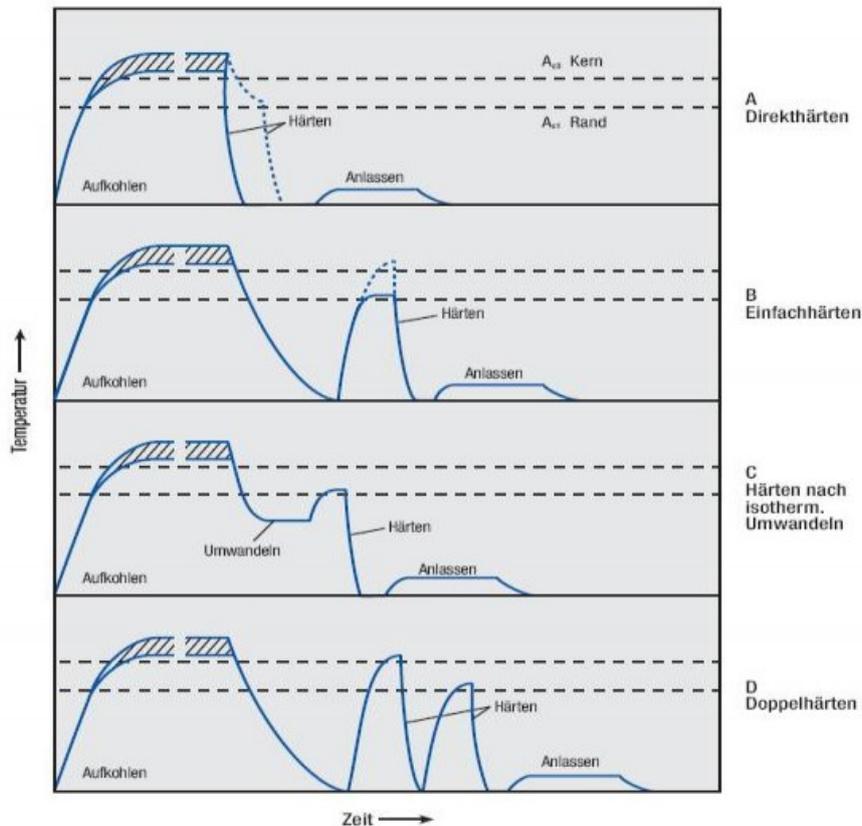


Abbildung 28: Härtevarianten, Einsatzhärten

Vorteile:

- Steigerung des Verschleißwiderstandes durch erhöhte Randschichthärte
- Erhöhung der Belastbarkeit
- Verbesserung der Biegewechselfestigkeit und Überlasttoleranz durch zähen Kern
- Verbesserter Widerstand gegen Risse und Brüche
- Partielles Härten möglich
- Verbesserte Ermüdungsfestigkeit
- Robustes Verfahren
- Nicht zu härtende Bereiche können abgedeckt werden
- Harte, verschleißbeständige Randschicht & zäher Kern

Abbildung 29 zeigt einen möglichen Einsatzhärtevorgang.



Abbildung 29: Einsatzhärtevorgang

3.5.3.2 Nitrieren und Nitrocarburieren

Nitrieren ist ein Verfahren zum Randschichthärten von Stählen. Es ist ein thermochemischer Prozess bei dem die Oberfläche eines Eisenwerkstoffs mit Stickstoff angereichert wird um das Verschleißverhalten von Bauteilen zu verbessern.[31]

Unterschieden wird zwischen dem Nitrieren (Aufnahme von Stickstoff in der Bauteiloberfläche) und Nitrocarburieren (Aufnahme von Stickstoff und Kohlenstoff). Das Nitrieren wird üblicherweise bei legierten Stählen angewandt. Niedrig und unlegierte Stähle werden bevorzugt nitrocarburiert. Die Behandlungstemperaturen liegen bei maximal 590°C. Da es hier noch zu keiner Gefügeumwandlung kommt, ist das Verfahren besonders verzugsarm. Viele Teile müssen nach dem Nitrieren nicht mehr mechanisch bearbeitet werden. Diese Behandlung bewirkt, je nach Werkstoff, eine Oberflächenhärte von bis zu 1200 HV (Vickers Härte).

Das Nitrieren wird üblicherweise im Temperaturbereich von 450 bis 600 °C, vorzugsweise jedoch zwischen 500 bis 550 °C, und das Nitrocarburieren vorzugsweise bei 570 bis 580 °C durchgeführt.[32]

Beim Nitrieren setzt sich die Nitrierschicht in der Regel aus zwei Zonen zusammen. Die innere Zone, die Diffusionsschicht, ist charakterisiert durch die Bildung von Nitridnadeln³ im Randbereich des Bauteils. Die übliche Schichtdicke liegt zwischen 0,2 und 1,5 mm. Die äußere Zone mit einer Dicke zwischen etwa 5 und 30 µm wird als Verbindungsschicht bezeichnet. Diese nicht-metallische Schicht besteht aus Eisennitriden oder Nitriden eventueller Legierungselemente. Der äußerste Bereich der Verbindungsschicht kann als Porensaum ausgebildet sein, der aber durch eine nachträgliche Oxidation zur Verbesserung der Korrosionsschutzeigenschaften beiträgt.[34]

³ als Nitridnadeln bezeichnet man die chemischen Verbindungen des Stickstoffs mit einem weiteren, weniger Element, z.B. Eisen

Beim Nitrocarburieren (Abbildung 30) steht die Ausbildung der Verbindungsschicht im Vordergrund der Behandlung. Somit lassen sich zielgerichtet Verschleiß- und Korrosionseigenschaften verbessern. Durch eine Kombinationsbehandlung von Nitrocarburieren und Oxidieren lässt sich Korrosionsbeständigkeit vieler Eisenlegierungen weiter erhöhen.[34]

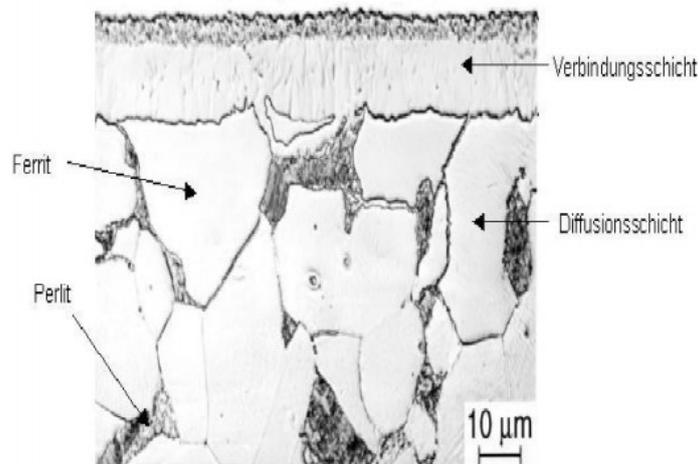


Abbildung 30: Nitrocarburiertes perlitisches-ferritisches Gefüge

Die Einlagerung von Stickstoff (und Kohlenstoff) in die Bauteiloberfläche hat eine Härtesteigerung in diesem Bereich zur Folge. Hier bilden sich mit den Legierungselementen Sondernitride, die die Härte beträchtlich erhöhen. Der Kern des Bauteils bleibt jedoch unverändert und behält seine Festigkeit und Zähigkeit. Die Oberflächenhärte kann je nach Werkstoff bis weit über 1000 HV (über 70 HRC) liegen. Je nach Behandlungszeit dringen die Stickstoffatome mehr oder weniger tief in das Bauteil ein. Diese Tiefe wird über die Nitrierhärte (Nht) bestimmt. Das ist die Tiefe, in der die Randschicht eine Härte von 50 HV über der Kernhärte des Bauteils aufweist. Eine Nht von 0,5-0,6 mm ist bei vielen Stählen problemlos zu bewerkstelligen, eine größere Nht ist meist nur mit sehr hohem Aufwand zu erreichen.[32]

Je länger die Nitrierdauer, desto größer die Nitrierhärte. Je höher die Temperatur gewählt wird, desto tiefer kann der Stickstoff bei gleicher Verfahrensdauer eindringen. Allgemein sinkt jedoch die Eigenhärte der Nitrierschicht mit zunehmender Behandlungstemperatur.

Sondernitride haben eine hohe Härte. Die höchste Härte weisen Aluminiumnitride auf, weshalb häufig bei den Nitrierstählen Aluminium zulegiert wird.[32]

allgemeine Vorteile:

- Erhöhter Verschleißschutz
- Geringer Verzug / geringe Maßveränderung (keine Gefügewandlung)
- Erhöhung der Biegezugfestigkeit / Dauerfestigkeit
- Zunahme der Wälzfestigkeit
- Verbesserung der Temperaturbeständigkeit
- Hohe Reproduzierbarkeit bei Serienteilen
- Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit bei nachfolgender Oxidation
- Verbesserung der Notlaufeigenschaften bei nachfolgender Oxidation
- Anwendbar für fast alle Stähle
- Harte Oberfläche bei weichem Kern
- Lokales Nitrieren durch Abdeckmittel
- Hoher Widerstand gegen Abrieb
- Verbesserte Hitzebeständigkeit bis ca. 500 °C
- Niedrigerer Reibungskoeffizient

3.5.3.3 Borieren

Borieren ist ein thermochemisches Randschichthärteverfahren, das sich für eine Vielzahl von Eisen- und auch Nichteisen-Metallen sowie metallkeramische Werkstoffe eignet. Bei Behandlungstemperaturen im Bereich von ca. 800 bis 1000 °C wird die Randschicht eines Werkstückes mit Bor angereichert, es bilden sich geschlossene Boridschichten. Im Prinzip lassen sich alle Ferrometalle borieren, wichtig dabei ist jedoch das der Siliziumgehalt nicht mehr als 1% beträgt und der Aluminiumgehalt unter 0,005 % bleibt, wegen der hohen Prozesstemperatur und auch Stähle mit einem hohen Siliziumanteil können wegen der Unlöslichkeit des Kohlenstoffs und Siliziums in der Boridschicht nicht boriiert werden.[37]

Dem Prozess liegt eine Zwei-Stufen-Reaktion zugrunde. Im ersten Schritt reagiert eine borabgebende Substanz. Dieser Reaktionsschritt ist abhängig von der Temperatur und der Behandlungsdauer. Dabei entsteht eine dünne, dichte Boridschicht. Der zweite Reaktionsschritt beinhaltet einen schnellen Diffusionsprozess. Die Schichtdicke kann über die Behandlungszeit gesteuert werden. Sie variiert von 5 bis 10 μm für Bauteile, bei denen die Kaltschweißneigung reduziert werden soll, bis zu Werten von 100 μm für Bauteile, bei denen eine reine Verschleißbeanspruchung vorliegt. Die Werkstoffwahl wird darauf abgestimmt. Je höher der Legierungsgehalt, desto geringer ist üblicherweise die erreichbare Schichtdicke.[38]

Das Borieren führt zu einem Volumenwachstum, welches ca. 25 bis 30% der Schichtdicke entspricht. Deshalb ist bei Fertigteilen gegebenenfalls ein entsprechendes Untermaß vorzusehen. Die resultierende Rautiefe beträgt ca. 4 μm . Nach dem Borieren ist ein Honen oder Schleifen mit Diamant möglich. Aufgrund der hohen thermischen Belastbarkeit der Boridschicht können die Bauteile nach dem Borieren noch gehärtet bzw. vergütet werden, wodurch einerseits eine gute Tragfähigkeit bei hohen Flächenbelastungen und andererseits eine hohe Festigkeit der Bauteile erzielt wird. [38]

Mit diesem Verfahren kann eine gleichmäßig harte Schicht von der Oberfläche bis hin zur Diffusionsschicht erzielt werden. Die dabei erreichte Härte ist um Einiges höher als bei anderen Oberflächenhärteverfahren.[39]

Mittels Schleiftellerverfahren wurden vergleichende Verschleißtests durchgeführt. Dabei wurde einer borierten Probe aus 42CrMo4 eine nitrierte Probe aus demselben Werkstoff gegenübergestellt. Der lineare Verschleißabtrag der borierten Probe war dabei rund 1000-mal kleiner als bei der nitrierten Probe.[38]

Vorteile:

- Wirtschaftliche Behandlung durch geringe Werkzeugkosten
- Besonders gute Haftung durch unregelmäßige Verzahnung der Borierschicht.
- Kernveredelung beim und nach dem Borieren möglich

- Gute Temperaturbeständigkeit
- Billigere Stahlsorten können verwendet werden (niedrig- und unlegierte Stähle)
- hohe Härte (Eisenbasislegierungen 1600 bis 2100 HV, Nickelbasislegierungen bis 2800 HV)
- Hohe Warmhärte
- Gutes Verhalten gegenüber sauren Medien

3.5.3.4 Andere thermochemische Verfestigungsverfahren

Abbildung 31 demonstriert alle thermochemische Diffusionsbehandlungen.

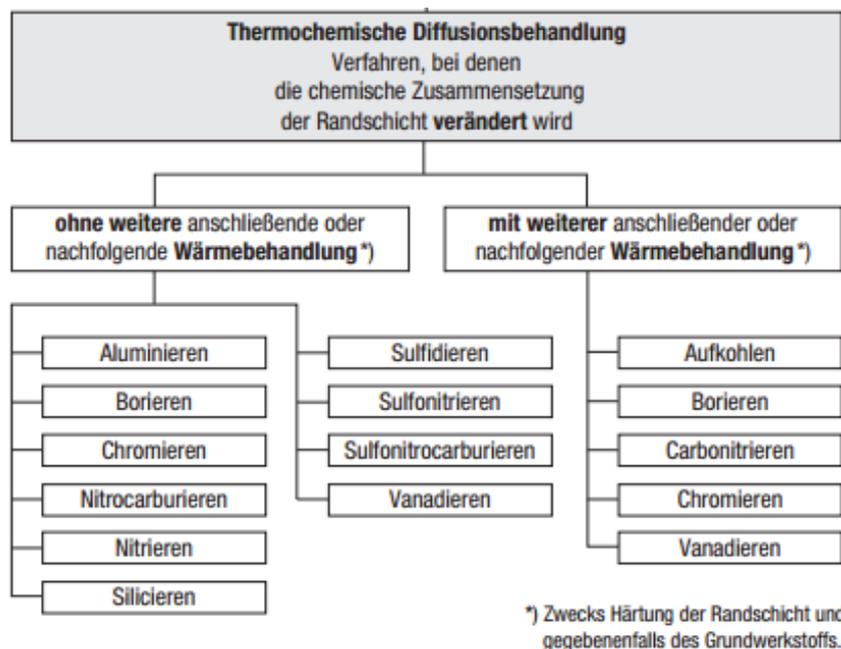


Abbildung 31: Thermochemische Diffusionsbehandlungen

Der Unterschied der einzelnen Verfahren liegt darin welches chemische Element in die Werkstoffoberfläche eindiffundiert. Neben den zuvor vorgestellten Elementen (Kapitel 3.5.3.1, Kapitel 3.5.3.2, Kapitel 3.5.3.3, Kapitel 3.5.3.4) gibt es noch Elemente wie Chrom (Chromieren), Silizium (Silicieren), Sulfid (Sulfidieren) und andere. Die Hauptvorteile sind dieselben, es gibt jedoch zu jedem Element Sondervorteile. Bei Aluminieren ist die Korrosionsbeständigkeit zum Beispiel besser als beim Borieren und anderen Verfahren.

3.5.4 Physical Vapor Deposition (PVD)

PVD bezeichnet eine Gruppe von vakuumbasierten Beschichtungsverfahren bzw. Dünnschichttechnologien.

Die Prozesse der physikalischen Abscheidung aus der Gasphase (physical vapour deposition) umfassen folgende Verfahren: Aufdampfen, Kathodenzerstäubung (Sputtern) und Ionenplattieren, sowie deren reaktiven Varianten (reaktives Gas (N,O,CxHy) in der Vakuumkammer). Der PVD-Prozess unterteilt sich in die drei Phasen: Zerstäubung, Diffusion und Schichtwachstum.[44]

Die Hauptanwendungsgebiete der PVD-Prozesse liegen in dünnen Schichten für optische, optoelektronische, magnetische und mikroelektronische Bauelemente. Weitere Anwendungen liegen auf den Gebieten der Tribologie, des Korrosionsschutzes, der Wärmeisolation und der dekorativen Schichten.[45]

Die Vakuum-Metallisierung ermöglicht das Aufdampfen verschiedenster Materialien: Aluminium, Gold, Silber, Platin, Zinn, Nickel, Chrom, Kupfer und Oxyde. PVD-Verfahren erlauben es, Bauteile unterschiedlicher Werkstoffe, Geometrien und Beschaffenheiten zu beschichten.[45]

Beim Bedampfungsprozess wird die zu verdampfende Substanz im Vakuum in einem geeigneten Behälter (Keramiktiegel; Ta-Schiffchen, W-Drahtspirale etc.) durch Energiezufuhr (Stromwärme, Elektronenstrahl, Laser, Bogenentladung u.a.) auf eine hinreichend hohe Temperatur erwärmt. Die thermisch freigesetzten Atome oder Moleküle verlassen die Oberfläche des Verdampfungsgutes und kondensieren als Schicht auf den Substraten und den umgebenden Wänden. Da der Prozess üblicherweise im Hochvakuum stattfindet (typische Arbeitsdrücke liegen im Bereich von 10^{-4} Pascal bis ca. 10 Pascal), bewegen sich die Beschichtungsteilchen praktisch geradlinig, d.h. ohne Kollisionen mit Gasatomen, von der Quelle zum Substrat. Durch Zugabe einer reaktiven Gaskomponente (z.B. Stickstoff, Kohlenstoff o.ä.) verbinden sie sich mit der Oberfläche der Werkteile. [45]

Die dabei erzeugten Schichtdicken auf Werkzeugen und Bauteilen bewegen sich zwischen einigen 100 Nanometern und maximal 15 μm . Das ganze Verfahren ist komplett Computergesteuert.[43]

Einzelne Schritte der Verfahren:

Zerstäubung

In einer Vakuum-Reaktionskammer befindet sich das nicht reaktive Edelgas Argon. Dort wird eine geeignete Gleich-, Mittel- oder Hochfrequenz-Spannung angelegt. Über der Kathode (Target), die aus dem Beschichtungsmaterial besteht, entzündet sich ein Niedertemperaturplasma. Positiv geladene Argon-Ionen werden im elektrischen Feld zur Kathode hin beschleunigt. Beim Aufprall schlagen diese Ionen Teilchen aus dem Kathodenmaterial. Dieses wird mit der Zeit nahezu vollständig zerstäubt.[40]

Diffusion

Die aus dem Target herausgelösten Atome verteilen sich wie ein Gas im Raum. Bei geeigneter Anordnung von Kathode und Substrat bewegen sich die Beschichtungsteilchen zum Substrat hin.[40]

Schichtwachstum

Ein gewisser Prozentsatz der gesputterten Atome trifft auf das Substrat auf und lagert sich dort ab. In der Regel sollen kristalline Schichten, in Einzelfällen auch amorphe Schichten, entstehen. Gerade für das Wachstum sehr reiner kristalliner Schichten müssen mehrere Bedingungen gleichzeitig erfüllt sein. Die geeignete Substrattemperatur und die richtige kinetische Energie der auftreffenden Teilchen zählen hierzu. [40]

Verschleißminderung durch PVD-Beschichtungen:

Abrasion

- Erhöhung der Oberflächenhärte Beispiel: TiN oder TiAlN [41]

Adhäsion

- Trennen der Reibpartner durch eine Schicht mit geringer Adhäsionsneigung Beispiel: CrN-T[41]

Tribochemische Reaktion

- Verminderung der Reaktionsfähigkeit ausbilden gleitfähiger Reaktionsschichten Beispiel: Bildung von Aluminiumoxyd auf TiAlN[41]

Voraussetzungen zum PVD Beschichten:

Materialeigenschaften

- metallische, elektrisch leitende Werkstoffe

Oberflächenbeschaffenheit

- metallisch blank (geschliffen, poliert, erodiert oder gestrahlt)
- nicht verchromt, brüniert, dampfangelassen und badnitriert
- Hochglanzpolitur bei Umformwerkzeugen
- geschliffene Oberflächen frei von Oxidhäuten und Neuhärtezonen
- Schneidkanten, Bohrungen und Flächen gratfrei
- funkenerodierte Oberflächen durch Mikrostrahlen vorbehandelt
- polierte Flächen frei von Poliermittel-Rückständen
- frei von Schleifstaub und Reinigungsmittel-Flecken
- entmagnetisiert

3.5.5 Chemical Vapor Deposition (CVD)

Die Chemische Gasphasenabscheidung, ist eine Beschichtungstechnologie zur Abscheidung von meist dünnen Schichten aus der Gasphase auf einem festen Substrat. Im Gegensatz zur physikalischen Gasphasenabscheidung (PVD) geschieht dies unter Beteiligung einer chemischen Reaktion, z.B. reagiert eine flüchtige gasförmige Komponente mit einem anderen Gas zu einem festen Material, das abgeschieden wird. Durch die Vielzahl der möglichen chemischen Reaktionen kann mit der CVD eine sehr große Anzahl von Materialien hergestellt werden: dünne Metall-, Metalloxid- und Halbleiterschichten, Siliziumoxid- und Polymerschichten.[47]

Die übliche Prozesstemperatur liegt zwischen 800 und 1 000°C.

Beispiel: TiCl_4 (Precursor) + CH_4 (Reaktivgas) \sim TiC (Schicht) + 4 HCl

Das Prinzip des Verfahrens besteht darin, dass gasförmige Ausgangsmaterialien, sog. Precursoren, über ein Substrat geleitet und dort chemisch zerlegt werden, wodurch auf der Substratoberfläche eine neue Schicht wächst. Die Zerlegung der Precursoren erfolgt meist thermisch durch Heizen des Substrates, allerdings existieren auch andere Verfahren, wie z.B. die Plasmaanregung und die Anregung mittels Licht. Kernstück einer CVD-Anlage ist der Reaktor mit dem Substrat. Er ist mit einem Gasleitungssystem verbunden, über das die Zuleitung der Precursoren, teils mit Hilfe eines Trägergases (H_2 , N_2 , He) erfolgt. Nach der chemischen Reaktion und dem Filmwachstum werden die verbleibenden Reaktanden abgepumpt. Je nach Druckbereich und Art der Precursor-Zerlegung unterscheidet man verschiedene CVD-Methoden, die spezifisch für das Wachstum bestimmter Materialien eingesetzt werden. Als Grenzfälle betrachtet man das System im thermodynamischen Gleichgewicht und berechnet die Gleichgewichtsverteilung der einzelnen Spezies im Reaktor. Variation der Temperatur kann zur Verschiebung des Reaktionsgleichgewichtes führen, was entweder eine Übersättigung der Gasphase, gefolgt von der Kondensation der entsprechenden Spezies, oder das Ätzen der Oberfläche zur Folge hat. Bei einem anderen Ansatz versucht man,

anhand kinetischer Modelle die Vorgänge im Reaktor mikroskopisch zu beschreiben. Hierzu fehlt jedoch oft eine genaue Kenntnis der einzelnen Zerlegungsreaktionen.[47]

Man kann zwischen drei thermochemischen Prozessen unterscheiden:

1. Pyrolyse, z.B. in der Si-Epitaxie
2. pyrolytische Synthese, z.B. in der metallorganischen Gasphasenepitaxie von III-V-Materialien
3. chemischer Transport, z.B. in der Chlorid-Epitaxie

Die Anwendungsgebiete der CVD sind vielfältig, sie ist eine verbreitete Methode zur industriellen Fertigung von mechanischen.

Abbildung 32 zeigt eine schematische Darstellung eines CVD-Systems. Gas fließt über ein geheiztes Substrat und wird dort thermisch zerlegt, gefolgt vom Schichtwachstum auf dem Substrat. Die übriggebliebenen Bestandteile werden abgeführt.[47]

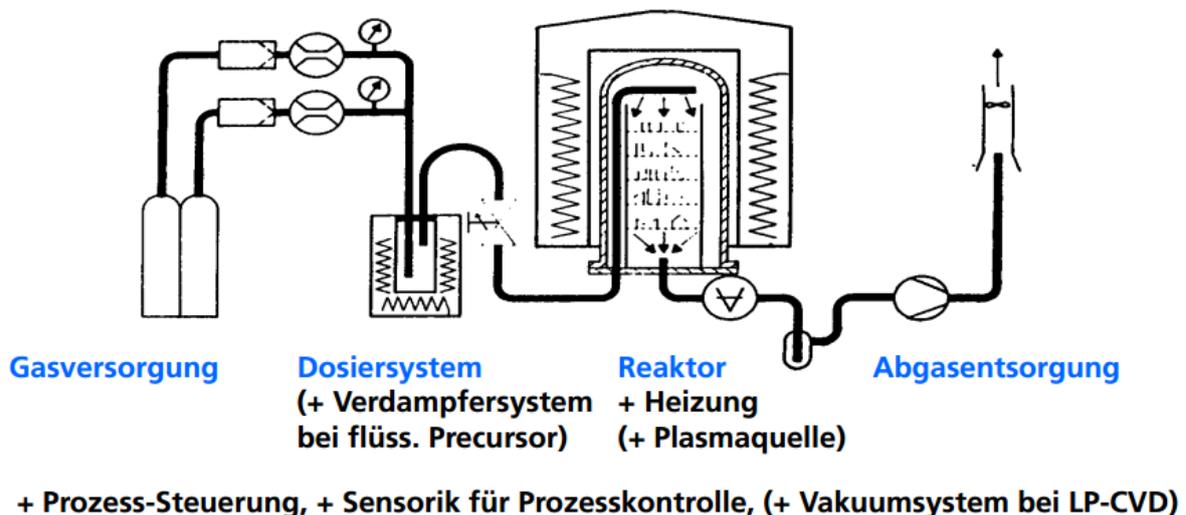


Abbildung 32: Schematik eines CVD-Systems

Vorteile:

- Vermeidung von abrasivem und adhäsivem Verschleiß
- große Vielfältigkeit an Materialein realisierbar

3.5.6 Thermisches Spritzverfahren

Die Verfahren des thermischen Spritzens (Abbildung 33) sind dadurch gekennzeichnet, dass ein pulver- oder drahtförmiger Werkstoff bzw. eine Suspension in eine Energiequelle geführt wird. Als Energiequelle dient ein Plasma (Plasmaspritzen), ein Lichtbogen (Lichtbogenspritzen) oder eine Brenngasflamme (Flammspritzen). Diese werden von einer Pistole oder einem Brenner unter Zuleiten von Gasen und/oder elektrischem Strom generiert, wobei der zugeführte Werkstoff an- oder aufschmilzt. Im Folgenden kommt es aufgrund der kinetischen Energie der Flamme oder des Plasmas zum raschen Beschleunigen der Partikel in Richtung des zu beschichtenden Grundwerkstoffes. Die Geschwindigkeit der Partikel ist hierbei verfahrens- und werkstoffabhängig. Beim Aufprall auf den Grundwerkstoff entsteht schließlich infolge der relativen Bewegung zwischen Werkstück und Pistole eine Schicht (Abbildung 34). Die Schicht wird schließlich durch Überlagerung der Teilchen aufgebaut. Ein wesentlicher Vorteil des thermischen Spritzens ist es, dass im Allgemeinen keine unzulässige Temperaturbeanspruchung des Substrats während des Beschichtens auftritt. Daher kommt es zu keiner Gefügeänderung des Grundwerkstoffes.[50]

Thermische Energie + Kinetische Energie = Thermisches Spritzen!

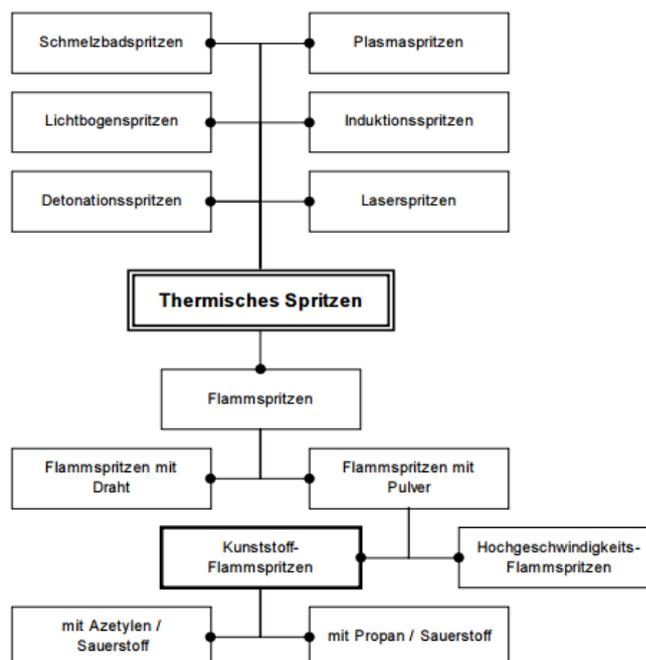


Abbildung 33: Thermische Spritzverfahren

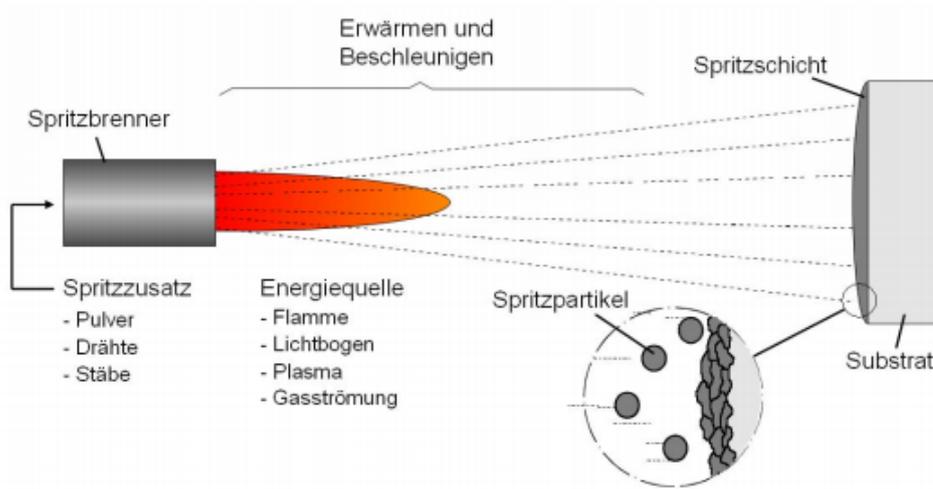


Abbildung 34: Prinzip des thermischen Spritzens

Werkstoffe für das thermische Spritzen:[50]

Metalle und Metalllegierungen

Cermets

Oxidkeramiken

Selbstfließende Legierungen

Organische Materialien

Sonderwerkstoffe

Abbildung 35 zeigt die Einflussfaktoren beim thermischen Spritzen.

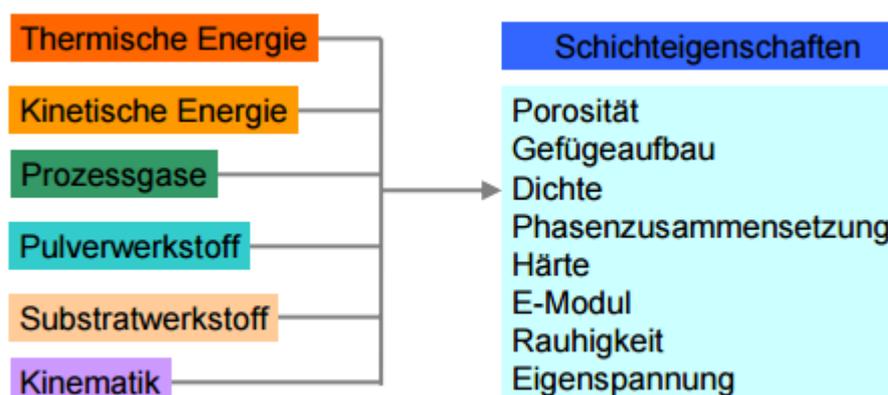


Abbildung 35: Einflussfaktoren beim thermischen Spritzen

Anwendungen:

Verschleißschutz, Korrosionsschutz, Wärmeschranken, Reibverschleiß, Partikelerosion, Kornabrieb, elektr. Leitfähigkeit, elektr. Widerstand, Hochtemperaturschutz, Ausschussrettung, Lagerschichten, chemische Belastung, oxidierende Atmosphäre, Notlaufeigenschaften, Dekorationsschichten

Vorteile:

- jedes Material lässt sich beschichten
- jedes Material lässt sich verspritzen
- das zu beschichtende Material wird nicht thermisch verändert
- jede Bauteilgröße und Geometrie kann beschichtet werden
- exzellente Automatisierbarkeit des Thermischen Spritzprozesses
- flexibler Einsatz
- sehr gute Reproduzierbarkeit
- hohe Maßgenauigkeit
- hoher Qualitätsstandard
- in der Spritzschicht sind mehrere Elemente enthalten oder können kombiniert werden (z.B. Cr, Ni, Karbide usw.)

3.5.7 Galvanische Beschichtung

Beim Galvanisieren wird das Werkstück in eine wässrige Metallsalzlösung (Elektrolyt) getaucht und an den negativen Pol einer Gleichstromquelle angeschlossen. Es ist jetzt kathodisch geschaltet (Kathode). Das Metall, das abgeschieden werden soll kommt ebenfalls in den Elektrolyten und wird mit dem positiven Pol der Gleichstromquelle verbunden (Anode).[54]

Der Elektrolyt enthält vor allem ein in Ionen aufgespaltetes Salz des Metalls, das auf dem Werkstück abgeschieden werden soll. Wird jetzt eine Gleichspannung angelegt, geht die Anode als Metallion in Lösung. Diese Metallionen werden von dem Werkstück (Kathode) angezogen und scheiden sich dort als Metall-Überzug



ab. Nach diesem Prinzip lassen sich fast alle Metalle für unzählige Anwendungsgebiete aufbringen.[54]

Der galvanische Überzug auf den Grundwerkstoff liefert die gewünschten Oberflächen-Eigenschaften: Z.B. Verschleißschutz, Korrosionssicherheit, Härte, chemische Beständigkeit oder Glanz mit bestechender Optik.[54]

Die Schichtdicken können weniger als 1 μ (1/1000 mm) bis zu mehreren 100 μ betragen und als einzelne Schichten sowie als Schichtkombinationen aufgetragen werden.[53]

Zu der Qualitätssicherung gehören ständige Analysen der Badparameter, wie Säure und Metallgehalt und die Kontrolle des Aussehens und Farbe der Schichten.[54]

Oft verwendete Schichten:

- Zink-Phosphatierschichten
- Mangan-Phosphatierschichten
- Chemisch Nickel Dispersionsschichten

4 Theoretische Maßnahmen um Kettenverschleiß zu mindern

Im Kapitel 3 wurden alle Möglichkeiten zur Verschleißminderung im Sinne des Standes der Technik besprochen. In diesem Kapitel soll nun aufgezeigt werden, welche Zusammensetzung aus Grundwerkstoff und Verfestigungsverfahren für die Verschleißminderung von Ketten am besten geeignet ist.

Häufig sind Ketten extremen Bedingungen wie Temperatur, Feuchtigkeit und abrasiv wirkenden Fördergütern ausgesetzt. Die dadurch gegebene tribologische Beanspruchung in den Kontaktzonen zwischen den einzelnen Kettenelementen sowie zwischen Kettenelement und Kettenrad, können zu einem beträchtlichem Werkstoffabtrag führen, wodurch die Lebensdauer des Systems reduziert wird. Bei Erreichen eines bestimmten Grenzwertes ist ein Austausch der Kette erforderlich, um die Funktion aufrecht zu erhalten oder gar einen Bruch zu vermeiden.[55]

Die Kraftübertragung bei Ketten erfolgt oft über Metall/Metall-Kontakt und zum Teil über einen Abrasivstoff. Die eingesetzten Konstruktionswerkstoffe sollten anitadhäsive Eigenschaften aufweisen, um den Anteil des Adhäsiven Verschleiß niedrig zu halten und eine höhere Härte besitzen um den Furchungsprozess durch den durch den Abrasivstoff hohen Widerstand entgegenzusetzen. In der Kontaktzone tritt bei den Kettengliedern außerhalb der Kontaktfläche, in den konstruktiv bedingten divergierenden Spalten, Erosion auf. Es ist bekannt, dass sowohl die Prozesse in der Kontaktzone als auch die in der Erosionszone von physikalischen und chemischen Einflüssen des Umgebungsmediums in starkem Maße beeinflusst werden können. Einerseits ist eine direkte entfestigende Wirkung auf die Körner des Abrasivstoffes bekannt, zum anderen wird der Kettenwerkstoff korrosiv angegriffen.[55]

Abbildung 36 zeigt eine Rundstahlkette und deren Verschleißspuren aufgrund ihrer maschinenbaulichen Verwendung.

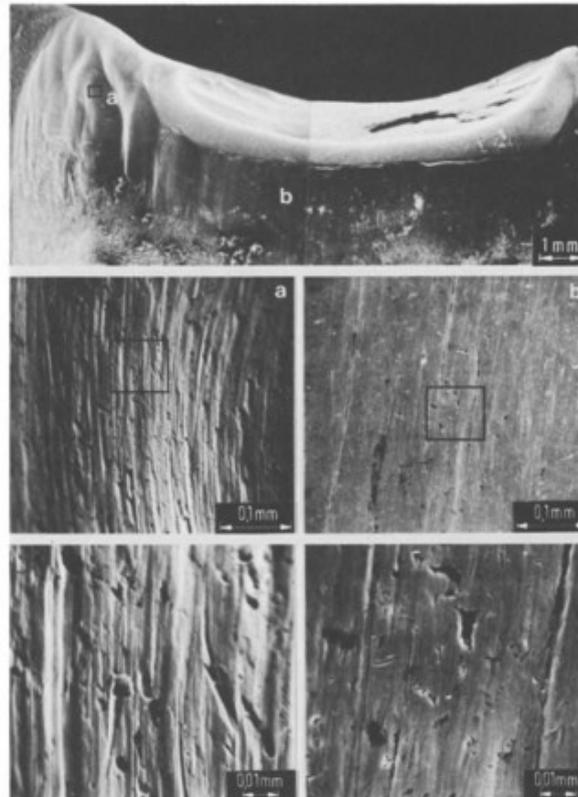


Abbildung 36: Verschleißerscheinungen einer Rundstahlkette

4.1 Geeignete Werkstoffe für Ketten

Für Ketten ist eine gewisse Resistenz gegen Verschleiß, äußere Belastungen als auch Korrosion unabdingbar, deswegen ist es wichtig neben Randschichtverfestigungsverfahren auch direkt auf den Grundwerkstoff selbst zu achten (auch nachzulesen in Kapitel 3.3). Es macht einen Unterschied aus, ob man sich auf Rundstahlketten spezialisiert oder auf Stahlgelenkketten. Stahlgelenkketten werden aus mehreren Einzelteilen zusammengebaut, während die Rundstahlkettenglieder miteinander verschweißt werden. Das Schweißen ist ein entscheidender Punkt in der Frage welchen Werkstoff man nimmt. Die Schweißbarkeit eines Werkstoffes ist dann besonders günstig, wenn der Kohlenstoffgehalt nicht zu hoch ist bzw. bei höher legierten Werkstoffen das Kohlenstoffäquivalent (CEV).

Der Kohlenstoffgehalt sollte kleiner gleich 0,22 sein, wenn man mit vielen Legierungselementen zu tun hat sollte man sich auf das Kohlenstoffäquivalent konzentrieren, welches einen Wert von 0,5 nicht übersteigen sollte. Diese Zwangsbedingungen schränken die Werkstoffwahl stark ein, wenn man sich auf die Härte eines Materials konzentriert, da der Kohlenstoff für die Härte eine wichtige Rolle spielt. Je mehr Kohlenstoff, desto größer ist die maximal erreichbare Härte. Die Härte wiederum ist entscheidend für die Verschleißfestigkeit eines Werkstoffes. Eine hohe Verschleißfestigkeit ist für Ketten enorm wichtig, da diese in extremen Umgebungen, wie Bergbau, zum Einsatz kommen. Stähle wie zum Beispiel der X230CrVMo13-4 (Kaltarbeitsstahl) haben eine Härte von ungefähr 2700 HB (Härte nach Brinell). Zum Vergleich, ein Referenzstahl für gute Reibschweißbarkeit, wie der 30CrNiMo8, besitzt eine maximale Härte von 250 HB (im vergüteten Zustand). Jedoch ist der Kaltarbeitsstahl aufgrund seines hohen Kohlenstoffgehaltes und seiner hohen Legierungsanteile unmöglich wirtschaftlich zu schweißen. Deswegen muss man einen Kompromiss zwischen eines mäßigen Kohlenstoffgehaltes und einer daraus resultierenden geringeren Härte eingehen. Das Reibschweißen ist ein Schweißverfahren, welches sich noch besser mit einem höheren Kohlenstoffanteil verträgt, hier kann man schon auf bis zu 0,5% Kohlenstoff gehen, aber das ist dann schon die maximale Grenze. Man kann die Stähle je nach Legierungselemente später noch zusätzlichen Verschleißoptimierungsverfahren, wie den Randschichtverfestigungsverfahren, aussetzen. Der Nirostahl X6CrNiMoTi17-12-2 beispielsweise hat mit einem Kohlenstoffgehalt von 0,08% hervorragende Voraussetzungen für die Schweißbarkeit mittels des Reibschweißverfahrens beispielsweise. Jedoch ist er mit einer Härte von 215 HB unter der von dem Referenzstahl 30CrNiMo8. Damit dieser Nirostahl konkurrieren kann, benötigt er eine Randschichtverfestigung. Diese kann ihn zwar über die Härte des 30CrNiMo8 bringen, die bedeutendste Frage hierbei ist aber wie es von der wirtschaftlichen Seite aussieht. Wenn man also eine große Menge dieser Kette herstellt wird es sicher von Vorteil sein sich den Nirostahl mit einem passenden Verfestigungsverfahren nachträglich zu bearbeiten.



Doch die effektivste Lösung ist es bestimmt wenn man von vorn herein an die Grenze geht was die höchste Härte im Bezug auf einen ertragbaren Kohlenstoffgehalt angeht.

Ein weiterer entscheidender Punkt den man dem Grundwerkstoff anrechnen muss, ist welche Geometrie die Kette hat. Konventionelle Rundstahlketten haben zwischen den Kettengliedern nicht allzu große Flächen, was dazu führt das hier die Flächenpressung enorm hoch werden kann und es dadurch zu Pittings (Abplatzungen resultierend aus zu hohen Flächenpressungen) kommen kann. Daher kommt immer mehr die Überlegung, ob man die Geometrie an diesen Berührungspunkten abändert und somit die Berührflächen der Kettenglieder vergrößert. Auf diese Weise kann man die Flächenpressung minimieren, was auch zu einem geringeren Risiko des Versagens der Kette führen würde. Wenn eine Kette zum Beispiel Einsatzgehärtet oder ähnliches ist, ist diese Härteschicht nicht sehr dick (im Millimeter-Bereich), wenn die Flächenpressung zu groß wird platzt diese einsatzgehärtete Schicht auf und auf diese Weise kann später durch schwenkende Bewegungen der Kettenglieder der Verschleiß stark beschleunigt werden. Auch bei den Außenflanken der einzelnen Kettenglieder will man Versuchen die Geometrie zu verändern, nämlich dahingehend das die Fläche im Gegensatz zu den Berührflächen der Kettenglieder, sich verringert. So soll die Berührungsfläche die die Kette mit dem Maschinenrahmen hat minimiert werden und dadurch soll auch der Verschleiß der Kette verringert werden. Finite Elemente Simulationen zeigen, dass diese Geometrieänderungen an den Berührflächen der Kette mit ihrer Umgebung bzw. auch mit den anderen Kettengliedern, die Spannungsspitzen reduzieren kann und dadurch die Lebensdauer der einzelnen Kettenglieder verlängert werden kann. Nach dem Sprichwort: "Die Kette ist so stark wie ihr schwächstes Glied!", folgt daraus das auch die Kette eine längere Lebensdauer hat.

Wenn man sich in der Voest Alpine GmbH genauer im Stahlsortiment umsieht, sticht einem der Durostat 500 ins Auge. Der Durostat 500 besitzt einen CEV(Kohlenstoffäquivalent) von 0,53, das ist schon an der Grenze der freien Schweißbarkeit ohne Vorwärmen, etc. Jedoch beträgt seine Härte im Schnitt 520 HB und das ist deutlich höher wie die 250HB von dem 30CrNiMo8 Stahl. Auch der Preis von derzeit 1,52€/kg ist unter dem Preis des 30CrNiMo8, dieser kostet zurzeit 1,90€/kg. Ein weiterer Alternativstahl ist der 21MnSi5, er wird von der DIN 22252 (DIN für Rundstahlketten im Bergbau) als äußerst effizient im Bezug auf den Kettenverschleiß beschrieben. Er wird vergütet und besitzt eine Härte von ungefähr 420 HB. Ein weiterer Stahl wäre der Nirostahl X39CrMo17-1, mit einer Härte von maximal 280HB und einem Kohlenstoffgehalt von 0,33. Da er aber nur bedingt gut scheidbar ist und einen Kilopreis von 3,40€ hat, ist er aus wirtschaftlicher Sicht nicht für die Produktion geeignet.

Der absolute Favorit für den Kettenwerkstoff mit einer hohen Verschleißbeständigkeit, ist der 20CrMo5. Mit einem Kohlenstoffgehalt von 0,2% ist er bestens für das Reibschweißen geeignet. Seine Härte aus dem Guss heraus beträgt ungefähr 220HB. Das was diesen Stahl aber extrem effizient in der Hinsicht auf die Verschleißfestigkeit macht, ist das man diesen Stahl noch Einsatzhärten kann, damit steigt seine Härte auf 605HB. Die größte Härte erreicht man wenn man neben dem Einsatzhärten auch noch chemisch vernickelt, hier erreicht man eine Härte von bis zu 680HB (Abbildung 37).[59]



Abbildung 37: Oberfläche eines 20CrMo5 nach Einsatzhärtung und chemischer Vernickelung

An dieser Stelle sollte erwähnt werden, dass der 20CrMo5 aufgrund seines Preises in Relation gesehen der Favorit ist. Würde man ein bisschen mehr Geld ausgeben könnte man den 18CrNiMo7-6 als Favoriten benennen. Dieser hat nämlich eine bessere Streckgrenze, Zugfestigkeit und damit auch eine bessere Härte, damit resultiert als Endergebnis eine höhere Verschleißbeständigkeit.

42CrMo4 ist ein klassischer Vergütungsstahl. Nach dem Vergüten besitzt dieser Stahl eine Härte von ungefähr 240HB. Dieser Stahl ist optimal zum Borieren geeignet, da sein Siliziumgehalt unter 1% liegt und zweitens besitzt er keinen Aluminiumanteil. Borieren kann die Randschichthärte und damit seine Verschleißbeständigkeit deutlich steigern. Die Schweißbarkeit ist mit durchschnittlich 0,42% Kohlenstoff nicht mehr optimal, beim Reibschweißen, wie es bei den Ketten üblich ist, ist das aber noch im sicheren Bereich. Sein Kilopreis beträgt im Mai 2016 circa 2,1€.

Würde man eine Rangordnung der Werkstoffverbesserung in Hinsicht der Stähle erstellen, wobei als Referenzstahl der 30CrNiMo8 stehen würde, würde diese aufgrund der Schweißbarkeit, der Härte und der Wirtschaftlichkeit wie folgt aussehen:

1. 18CrNiMo7-6: gutes Verschleißverhalten, geringer Kohlenstoffgehalt
2. 20CrMo5 (Einsatzgehärtet + chemisch vernickelt): Härte: 680HB, C⁴:0,2%
3. Durostat 500:Voest Alpine GmbH: Härte: max. 540HB, CEV:0,53, 1,52€/kg
4. 21MnSi5 (Vergütet): Vorschlag in DIN 22252, Härte: 420HB
5. 42CrMo4: C:0,42, 2,1€/kg, Härte (Vergütet): 240HB
6. X39CrMo17-1: HB: max. 280 HB, C: 0,33%, 3,90€/kg (zu Teuer!)

⁴ C bedeutet Kohlenstoff

4.2 Verfestigungsverfahren für Kettenwerkstoffe

In Kapitel 3.5 wurden alle gängigen Verfestigungsverfahren besprochen, wobei ein Großteil auch auf Ketten angewandt werden kann. Der Vorteil der Verfestigungsverfahren ist, dass die Randschicht gehärtet wird, der Kern aber trotzdem zäh bleibt. Damit der Werkstoff eine hohe zyklisch beanspruchte Lebensdauer hat, wie es bei der Kette sein muss, ist ein richtiges Verhältnis von Randschichtfestigkeit zu Zähigkeit im Kern sehr wichtig. Die einzelnen Verfahren haben unterschiedliche Härtetiefen.

Das einzige mechanische Verfahren, das sich wirklich lohnt in Hinsicht auf Machbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Verschleißoptimierung, ist das Kugelstrahlen (Kapitel 3.5.1.1).

Neben den mechanischen Verfahren gibt es auch noch thermische, thermochemische Verfahren, sowie CVD und PVD, als auch galvanisches Beschichten, etc. Es wurden schon so viele Verfahren erfunden, sodass man eine große Auswahl an Möglichkeiten hat, seinen Werkstoff und im Weiteren sein Bauteil zu verfestigen und somit die entscheidende Härte in der Randschicht zu erhöhen, umso den Verschleiß zu mindern. Um Rundstahlketten in der Randschicht zu verfestigen, ist es ratsam aufgrund der großen Auswahl, zuerst auf die Wirtschaftlichkeit zu achten, wenn natürlich die Machbarkeit mit dem jeweiligen Verfahren geklärt ist. Das CVD-Verfahren (Kapitel 3.5.5) sowie das PVD-Verfahren (Kapitel 3.5.4) sind von der wirtschaftlichen Seite her nicht geeignet. Diese Verfahren bedienen sich sehr teurer Anlagen und einem extremen Knowhow. Machbar sind sie natürlich allemal, wenn man bereit ist, in dieses Verfahren zu investieren, hat man mit Sicherheit eine sehr gute und verschleißfeste Oberfläche, welche sehr gleichmäßig ist.

Ebenso das galvanische Beschichten (Kapitel 3.5.7) oder das thermische Spritzen (Kapitel 3.5.6) sind sehr teuer. Diese beiden Verfahren haben aber viele Unterverfahren, was sie sehr vielseitig und attraktiv für Experimentierer macht. Um Rundstahlketten zu verfestigen, werden aber eher konventionelle Verfahren empfohlen.

Die Verfahren Einsatzhärten (Kapitel 3.5.3.1), Nitrieren und Nitrocarbourieren (Kapitel 3.5.3.2) und das Borieren (Kapitel 3.5.3.3) gehören zu den konventionellen Verfahren. Sie sind in der Praxis erfolgreich erprobt und gehören zu den am meist benutzten Verfahren.

Diese Verfahren sind günstig, einziger Nachteil ist das sie bei gewissen Legierungselementen nicht anwendbar sind. Zu den Vorteilen gehören die einfache Anwendung und die große Erfahrung die man über diese Verfahren hat. Genauso beliebt und ebenso wirksam, auch bei Ketten, ist das Induktionsverfahren (Kapitel 3.5.2.1) und das Flammhärten (Kapitel 3.5.2.2). Das Flammhärten ist aber eher ein aussterbendes Verfahren, weil es immer mehr durch das Induktionshärten ersetzt wird.

Das Induktionshärten ist eines der effektivsten Härteverfahren, es eignet sich auch besonders gut um Rundstahlketten zu härten (Abbildung 38).

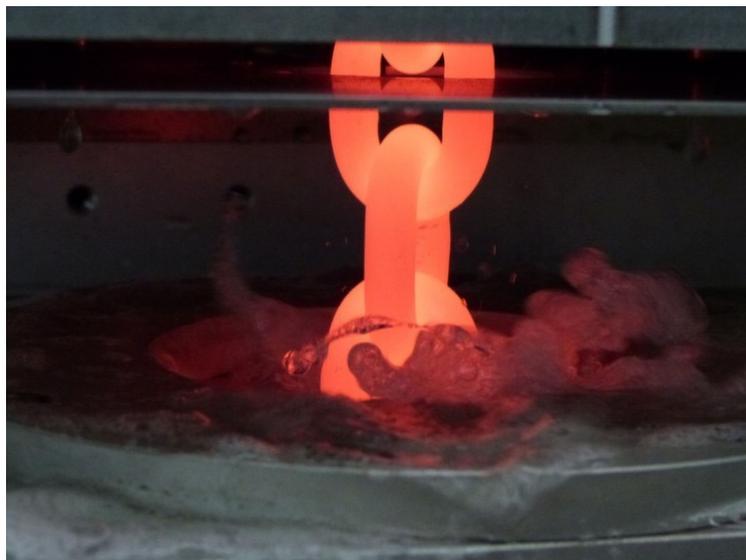


Abbildung 38: induktive Härtung einer Rundstahlkette

Der größte Nachteil des Induktionshärtens sind die hohen Anlagenkosten welche man auf sich nehmen muss. Bei einer Großserienfertigung rentieren sich die Anlagenkosten allemal.

Würde man auch hier eine Rangordnung im Bezug auf die Rundstahlkettenhärtung vornehmen, wobei man in erster Linie auf Machbarkeit,



Wirtschaftlichkeit und Verschleißoptimierung achtet, würde diese folgendermaßen aussehen:

1. Einsatzhärten: einfache Handhabung, universell einsetzbar, günstig, Zeit
2. Induktionshärten: effektive Härtung, hohe Anlagenkosten, schnell
3. Laserhärten: kurze Bearbeitungszeiten, komplexe Geometrien
4. Thermisches Spritzen: komplexe Geometrien, preiswert
5. Kugelstrahlen: komplexe Geometrien, in Relation günstig
6. Galvanisches Beschichten: komplexe Geometrien, hohe Anlagenkosten
7. Nitrieren, Karbonitrieren, Borieren: günstig, Einsatz abhängig von Legierungselementen
8. CVD, PVD: universell einsetzbar, hohe Anlagenkosten, für Großserien zu zeitaufwendig

4.3 Beste Kombination aus Werkstoff und Härtingsverfahren

Da man in den vorigen Kapiteln über den geeignetsten Werkstoff bzw. über das beste Verfestigungsverfahren gesprochen hat, ist es nun von größter Wichtigkeit eine Kombination aus beidem zu finden, umso die höchste Effektivität zu erzielen. Am effektivsten ist es die besten Werkstoffe aus Kapitel 4.1 mit den besten Verfestigungsverfahren aus Kapitel 4.2 auf Kompatibilität zu überprüfen.

Werkstoffe:

- 18CrNiMo7-6
- 20CrMo5
- Durostat 500
- 21MnSi5

Verfestigungsverfahren:

- Einsatzhärten
- Induktionshärtung
- Kugelstrahlen
- Galvanisches Beschichten (z.B. chemisches Vernickeln)
- Laserhärten
- Thermisches Spritzen

Prinzipiell ist es möglich die oben genannten Werkstoffe mit jedem Verfestigungsverfahren zusätzlich zu härten. Ein sehr gutes Ergebnis liefert die Kombination aus dem Werkstoff 20CrMo5 mit einer Einsatzhärtung und danach einer chemischen Vernickelung. Das Ergebnis ist ein sehr verschleißbeständiger Werkstoff mit einer Härte von bis zu 680 HB. Vorteil dieser Kombination ist das der Kern Zäh bleibt was den Werkstoff extra beständig macht.



Durostat 500 wird schon aus der Schmiedehitze auf 500HB gehärtet. Diesen Stahl könnte man zusätzlich versuchen noch mittels des Laserhärtens weiter zu härten. Auf diese Weise ist es sicher möglich noch einiges an Härte herauszuholen.

21MnSi5 ist laut DIN 22252 ein geeigneter Rundstahlkettenwerkstoff, er wird vergütet. Hier besteht die Möglichkeit eine zusätzliche Kugelstrahlung vorzunehmen um die Härte, die nach der Vergütung 420HB beträgt, weiter zu steigern.

Die fünf effektivsten Kombinationen von Werkstoff und Verfestigungsverfahren sind nach reichlicher Überlegung also (rein vom Standpunkt der Theorie):

1. 18CrNiMo7-6 + Einsatzhärten
2. 30CrNiMo8 + Einsatzhärten
3. 20CrMo5 + Einsatzhärtung + chemisches Vernickeln (680HB)
4. 42CrMo4 + Borieren
5. Durostat 500 + Flamspritzen mit Pulver
6. 42CrMo4 + Induktionshärten
7. Durostat 500 + Laserhärten

4.4 Zusammenfassung des Kapitels 4

Um den idealen Kettenwerkstoff zu finden muss man sehr viele Parameter beachten. Parameter sind zum Beispiel die mechanischen Bedingungen wie Belastungen, thermische Bedingungen, tribochemische Probleme, Kettengeometrie und zahlreiche andere. Die Härte ist von dem Kohlenstoff und anderen wichtigen Legierungselementen abhängig, jedoch behindern der Kohlenstoff bzw. gewisse Legierungselemente die Schweißbarkeit. Aus diesem Grund ist es oft wichtig einen Werkstoff mit geringerem Kohlenstoffgehalt zu wählen und dafür im Weiteren irgendeine Randschichtverfestigung bzw. Oberflächenbeschichtung zusätzlich zu nehmen umso die benötigte Verschleißbeständigkeit zu erreichen.

Ein guter Kettenwerkstoff muss folgende Eigenschaften aufweisen: hohe Härte, hohe Zugfestigkeit, gute Bruchdehnung und eine gute Schmiedbarkeit. Auf dem Gebiet der Entwicklung von Kettenwerkstoffen gibt es noch großes Potential in Hinsicht auf die Verschleißbeständigkeit. Die Frage wird sein wie man in Zukunft auch bei höheren Kohlenstoffgehalt bzw. höheren Kohlenstoffäquivalent die Kettenglieder miteinander verschweißen kann, da man so zu konstanten und wichtig hohen Härten kommen kann ohne einen Härteabfall in Richtung des Kerns zu erhalten wie es bei den Randschichtverfestigungsverfahren der Fall ist.

5 Praktische Versuche

In diesem Kapitel soll nun das Empirische den Vortritt erhalten. Es soll der bisher verwendete Kettenwerkstoff mit einem anderen Werkstoff verglichen werden. Es werden Zugversuche verglichen und auch Verschleißprüfungen mit einem Schwenk-Tribometer. Die Idee ist diese, das man versuchen will zuerst den Werkstoff, einen 30CrNiMo8, durch einen Zugversuch zu untersuchen wie seine Bruchdehnung zu Bruchkraft aussieht. Als nächstes wird der neue Werkstoff, einen 18CrNiMo7-6, ebenfalls durch einen Zugversuch in Hinsicht auf Bruchkraft und Bruchdehnung charakterisiert. Da Ketten neben abrasiven Verschleiß und Oberflächenzerrüttung auch noch adhäsiven Verschleiß stark ausgesetzt sind, versucht man hier eine Verschleißprüfung, wo man die zwei Werkstoffe, also den 30CrNiMo8 und den 18CrNiMo7-6, in den Schwenk-Tribometer einspannt und sich so die Verschleißrate im Vergleich zu dem Werkstoffverschleiß ansieht, den die Kette hat wenn die Kettenglieder mit dem jeweils gleichen Werkstoff in Berührung stehen. Das bedeutet ein Kettenglied ist aus einem 30CrNiMo8 und das zweite aus einem 18CrNiMo7-6 und so geht es dann abwechselnd weiter.

Durch diese Methode erwartet man sich das der adhäsive Verschleiß zurückgehen wird, da dieser dadurch entsteht wenn gleiche Werkstoffe durch Presskraft in Berührung kommen. Der adhäsive Verschleiß könnte einen weit höheren Schädigungsbeitrag leisten als bisher angenommen wurde. Genau das soll diese Versuchsreihe in dieser wissenschaftlichen Arbeit herausfinden und dokumentieren.

Man wird aber nicht wie im Kapitel 4.3 einen 20CrMo5 verwenden, sondern aus praktischen Gründen wie bereits angesprochen den 18CrNiMo7-6, da dieser für die Versuche leichter zu beschaffen ist und auch noch bessere Werkstoffeigenschaften besitzt, vom Preis her sind sie sich mit jetzigem Zeitpunkt etwas unterschiedlich, der 18CrNiMo7-6 ist teurer. Man soll aber an dieser Stelle erwähnen, dass der 30CrNiMo8 der bisher eingesetzt wird, schon eine sehr gute Performance leistet. Obwohl man sich durch die Minderung des adhäsiven Verschleißes eine doch gewisse Verschleißminderung erhofft, müsste man um Werkstoffe für die Kette besser optimieren zu können,

spricht um eine höhere Bruchkraft zu erreichen (braucht hohen Kohlenstoffgehalt) und trotzdem eine hohe Bruchdehnung zu haben (braucht niedrigen Kohlenstoffgehalt), zurück zum Stahldesign gehen und dort neue Legierungen ausprobieren. Eine gewisse Potential zeigen prinzipiell die Maraging-Stähle, die durch späteres Anlassen eine enorme Bruchdehnungszunahme erfahren, die Bruchkraft bleibt trotz diesem verspäteten Anlassen sehr hoch. Dieser Stahl hat extrem wenig Kohlenstoff und einen hohen Nickelanteil (>12%). Jedoch sind diese noch recht jungen Stähle zurzeit doch noch recht teuer, weshalb sie aus wirtschaftlichen Gründen noch nicht einsetzbar sind. Das sollte nur ein kleiner Exkurs sein um aufzuzeigen das man in diesem Gebiet wahrscheinlich viel Zeit mit Forschung verbringen kann um einen Kettenwerkstoff zu entwickeln der nahezu „perfekt“ ist. Der Kohlenstoff wird aber immer der größte Kompromissträger in dieser Thematik sein.

In dieser Versuchsreihe werden beide Werkstoffe einsatzgehärtet, da dies die wirtschaftlichste Methode ist um eine gute Oberflächenhärte zu erreichen und damit die Verschleißbeständigkeit des Werkstoffes zu erhöhen.

5.1 Vorstellung der geprüften Werkstoffe

Nun wird es Zeit, dass man sich die Werkstoffe, die geprüft werden, im Detail ansieht. Wie schon mehrmals in dieser wissenschaftlichen Arbeit erwähnt, wird als Referenzstahl der 30CrNiMo8 verwendet. Der Vergütungsstahl 30CrNiMo8 wird für Bauteile des Automobilbaus und des allgemeinen Maschinenbaus mit hohen Anforderungen an die Festigkeit und die Zähigkeit und guter Durchhärbarkeit, wie z. B. Befestigungselemente, verwendet. Aber auch in der Kettentechnologie hat dieser Stahl seinen Platz gefunden. Für diese Versuchsreihe wird der 30CrNiMo8 einsatzgehärtet, um somit an der Oberfläche eine höhere Härte als im Kern zu erreichen. Dadurch will man dem abrasiven Verschleiß und auch der Oberflächenzerrüttung entgegenwirken. Der 30CrNiMo8 ist mit einem durchschnittlichen Kohlenstoffgehalt von 0,3% schon schwerer wirtschaftlich zu schweißen. Aufgrund des Reibschweißverfahrens, welches verwendet wird, ist dieser Kohlenstoffanteil aber kein Problem für dieses

Schweißverfahren.

In Abbildung 39 sind physikalische Eigenschaften des 30CrNiMo8 ersichtlich, Abbildung 40 liefert Daten zu den mechanischen Eigenschaften. Nähere Informationen zu den Werkstoffeigenschaften findet man im Anhang A dieser Arbeit.

| Physikalische Eigenschaften | | |
|--|--|------|
| Dichte (kg/dm ³) | | 7,76 |
| Elastizitätsmodul (10 ³ MPa) | | 210 |
| Elektr. Widerstand bei 20 °C (Ω mm ² /m) | | 0,19 |
| Wärmeleitfähigkeit bei 20 °C (W/m K) | | 38,0 |
| Spez. Wärmekapazität bei 20 °C (J/kg K) | | 430 |
| Wärmeausdehnung im weichgeglühten Zustand (10 ⁻⁶ K ⁻¹) | | |
| 20 – 100 °C | | 11,5 |
| 20 – 200 °C | | 12,5 |
| 20 – 300 °C | | 13,3 |
| 20 – 400 °C | | 13,9 |

Abbildung 39: Physikalische Eigenschaften des 30CrNiMo8

| Mechanische Eigenschaften | Im vergüteten Zustand bei Raumtemperatur: | | |
|---|---|-------------|-------------|
| Durchmesser (mm) | ≤ 16 | > 16 ≤ 40 | > 40 ≤ 100 |
| Streckgrenze (MPa) | 1050 | 1050 | 900 |
| Zugfestigkeit (MPa) | 1250 – 1450 | 1250 – 1450 | 1100 – 1300 |
| Bruchdehnung (L ₀ = 5 d ₀) (%) | 9 | 9 | 10 |
| Brucheinschnürung (%) | 40 | 40 | 45 |
| Kerbschlagarbeit ISO - V (J) | 30 | 30 | 35 |
| Durchmesser (mm) | > 100 ≤ 160 | > 160 ≤ 250 | |
| Streckgrenze (MPa) | 800 | 700 | |
| Zugfestigkeit (MPa) | 1000 – 1200 | 900 – 1100 | |
| Bruchdehnung (L ₀ = 5 d ₀) (%) | 11 | 12 | |
| Brucheinschnürung (%) | 50 | 50 | |
| Kerbschlagarbeit ISO - V (J) | 45 | 45 | |

Abbildung 40: Mechanische Eigenschaften des 30CrNiMo8

Zusammenfassend kann man über den 30CrNiMo8 sagen, dass er eine hohe Zugfestigkeit besitzt, auch eine hohe Streckgrenze, die Bruchdehnung ist für eine dynamische Belastung, wie man sie im Ketteneinsatz findet auch sehr gut und ebenso die Brucheinschnürung ist nicht zu verachten (immer auf jeweiligen Durchmesserbereich achten!). Bis jetzt hat dieser die beste Performance in Hinsicht auf den Verschleiß erbracht.

Als zweiter Werkstoff, der in dieser Versuchsreihe zum Einsatz kommt, verwendet man den 18CrNiMo7-6. Der Einsatzstahl 18CrNiMo7-6 wird für Zahnräder und Getriebeteile verwendet, die im Einsatz höchsten Belastungen unterliegen. Er ist dem 30CrNiMo8 prinzipiell sehr ähnlich, aber dadurch, dass man mit dem 30CrNiMo8 schon den zurzeit effektivsten Stahl benutzt, muss man versuchen Verschleißanteile, wie den adhäsiven Verschleiß, der noch nicht reduziert werden konnte, ebenfalls zu reduzieren. Der 18CrNiMo7-6 hat auch exzellente Eigenschaften um den abrasiven Verschleiß und auch die Oberflächenzerrüttung zu reduzieren, jedoch sollte man den adhäsiven Verschleiß auch versuchen zu reduzieren. Dies soll mit der Kombination des 30CrNiMo8 und des 18CrNiMo7-6 passieren. Ein Vorteil des 18CrNiMo7-6 ist, dass er nicht so teuer ist wie der 30CrNiMo8. Ein weiterer Vorteil gegenüber dem 30CrNiMo8 ist das er in der Regel mit jedem Schweißverfahren schweißbar ist. Der 30CrNiMo8 ist nur schweißbar mit Verfahren wie dem Reibschweißen. In Abbildung 41 werden kurz die physikalischen Eigenschaften nähergebracht und in der Abbildung 42 geht man auf die mechanischen Eigenschaften des 18CrNiMo7-6 ein (Anhang B).

| Physikalische Eigenschaften | Dichte (kg/dm ³) | 7,77 |
|------------------------------------|---|------|
| | Elastizitätsmodul (10 ³ MPa) | 210 |
| | Elektr. Widerstand bei 20 °C (Ω mm ² /m) | 0,12 |
| | Wärmeleitfähigkeit bei 20 °C (W/m K) | 49,0 |
| | Spez. Wärmekapazität bei 20 °C (J/kg K) | 431 |
| | Wärmeausdehnung im weichgeglühten Zustand (10 ⁻⁶ K ⁻¹) | |
| | 20 – 100 °C | 11,5 |
| | 20 – 200 °C | 12,5 |
| | 20 – 300 °C | 13,3 |
| | 20 – 400 °C | 13,9 |

Abbildung 41: Physikalische Eigenschaften des 18CrNiMo7-6

| Mechanische Eigenschaften | Durchmesser (mm) | 11 | 30 | 63 |
|----------------------------------|---|-------------|-------------|------------|
| | Streckgrenze (MPa) | 835 | 785 | 685 |
| | Zugfestigkeit (MPa) | 1180 – 1420 | 1080 – 1320 | 840 – 1270 |
| | Bruchdehnung (L ₀ = 5 d ₀) (%) | 7 | 8 | 8 |
| | Brucheinschnürung (%) | 30 | 35 | 35 |
| | Kerbschlagarbeit ISO - V (J) | 41 | 41 | 41 |

Abbildung 42: Mechanische Eigenschaften des 18CrNiMo7-6



Eine Möglichkeit um den vierten großen Verschleißanteil in der Tribologie, nämlich den Tribochemischen Verschleiß zu reduzieren, könnte man Oberflächenbeschichtungen wie das chemische Vernickeln wählen. Dies erhöht jedoch die Kosten und da muss man sich die Frage stellen, wie sehr der Tribochemische Verschleiß Anteil an dem gesamten Bauteilverschleiß hat.

Zusammenfassend zu beiden Werkstoffen kann man sagen, dass eine recht gute Verschleißminderung der Kettenglieder erwartet werden kann. Man versucht in dieser Verschleißprüfung auf die großen Verschleißanteile, denen die Kette ausgesetzt ist, durch langes Überlegen entgegenzuwirken. Die beiden Werkstoffe an sich zeigen durch ihre Grundeigenschaften und durch ihre einsatzgehärtete Oberflächenschicht schon ein sehr gutes Potential um dem abrasiven Verschleiß und der Oberflächenzerrüttung ihren Angriff zu erschweren. Dadurch, dass man diese Werkstoffe dann abwechselnd für die Kettenglieder einsetzt, also ein Glied aus dem 30CrNiMo8 und das nächste aus dem 18CrNiMo7-6 und so weiter bis die Kette geschlossen ist, wird man auch dem adhäsiven Verschleiß den Kampf ansagen, da der ja davon lebt, dass es der gleiche Werkstoff sein soll damit er effektiv zum Materialabtrag beitragen kann. Der Tribochemische Verschleiß wird einen nicht allzu hohen Beitrag zum Gesamtverschleiß bei diesen Ketten haben, da diese Ketten eher in einer konstanten Umgebung geführt werden (zwischen Maschinenrahmen, etc.).

5.1.1.1 Mögliche Oberflächenbehandlungen

An dieser Stelle wird erläutert, warum man sich als Oberflächenverfestigungsverfahren für das Einsatzhärten entschieden hat. Als ersten Punkt sollte man sich immer die wirtschaftliche Seite ansehen, denn das man mit seinen Produkten Profit schlagen will ist eine logische Gewissheit. Aus diesem Grund soll man Bauteile immer dahingehend entwickeln, welche Umgebungsbedingungen und Belastungen diese ausgesetzt sein werden. Für eine Kette zum Beispiel wird es immer eine extreme Umgebung in Hinsicht auf Abrasivpartikel und hohe Flächenpressungen sein. Der Grundwerkstoff spielt schon eine große Rolle, aber auch die Oberflächenausbildung sollte nicht vernachlässigt werden. Verwendet man Oberflächenverfestigungsverfahren oder eine Oberflächenbeschichtung? All diese Fragen werden aufgrund des Einsatzgebietes beantwortet. Auf diese Weise kann man ein Produkt entwickeln, welches noch am kostengünstigsten ausfallen wird und dennoch alles beinhaltet, was für den ausfallfreien Einsatz (für einen gewissen Zeitraum natürlich) vorausgesetzt wird. Da die Kette, wie schon mehrmals in dieser Arbeit besprochen, zu großen Teilen abrasiven Verschleiß und Oberflächenzerrüttung ausgesetzt ist, wird man eine hohe Oberflächenhärte benötigen. Aufgrund der extremen Umgebungsbedingungen wird man aber kein übertrieben teures Verfestigungsverfahren für die Oberfläche der Kette wählen, sondern ein konventionelles Verfahren das sich schon für solche Einsatzgebiete bewährt hat. Abbildung 43 zeigt die Oberflächenverfestigungsverfahren von der finanziellen Seite.

| <u>Verfahren</u> | <u>Kosten</u> |
|--|--------------------------|
| Einsatzhärten | kostengünstig |
| Nitrieren | |
| Nitrocarburieren | ↓ kostenintensiv ↓ |
| Borieren | |
| Chemisch- oder elektrochemisch Beschichten | |
| Spritzschichten | |
| CVD-, PVD- Beschichtungen | |

Abbildung 43: Kostenvergleich der Oberflächenverfestigungsverfahren

Aufgrund dieser Grafik wird ersichtlich das das Einsatzhärten nicht nur unter die günstigsten Oberflächenverfestigungsverfahren fällt, sondern auch schon sehr gut erprobt ist und man auch viel über diese Technologie weis.

Ein weiterer Vorteil des Einsatzhärtens ist, dass man eine Schicht hat die im Millimeter Bereich vorhanden ist. Sehr dünne Oberflächenschichten, zum Beispiel das PVD-Verfahren, können durch Oberflächenzerrüttung leicht aufgebrochen werden, wodurch der abrasive Verschleiß dann leichtes Spiel hat. Abbildung 44 zeigt informativ, welche Schichtdicken zu Härte man mit den einzelnen Verfahren erreichen kann.

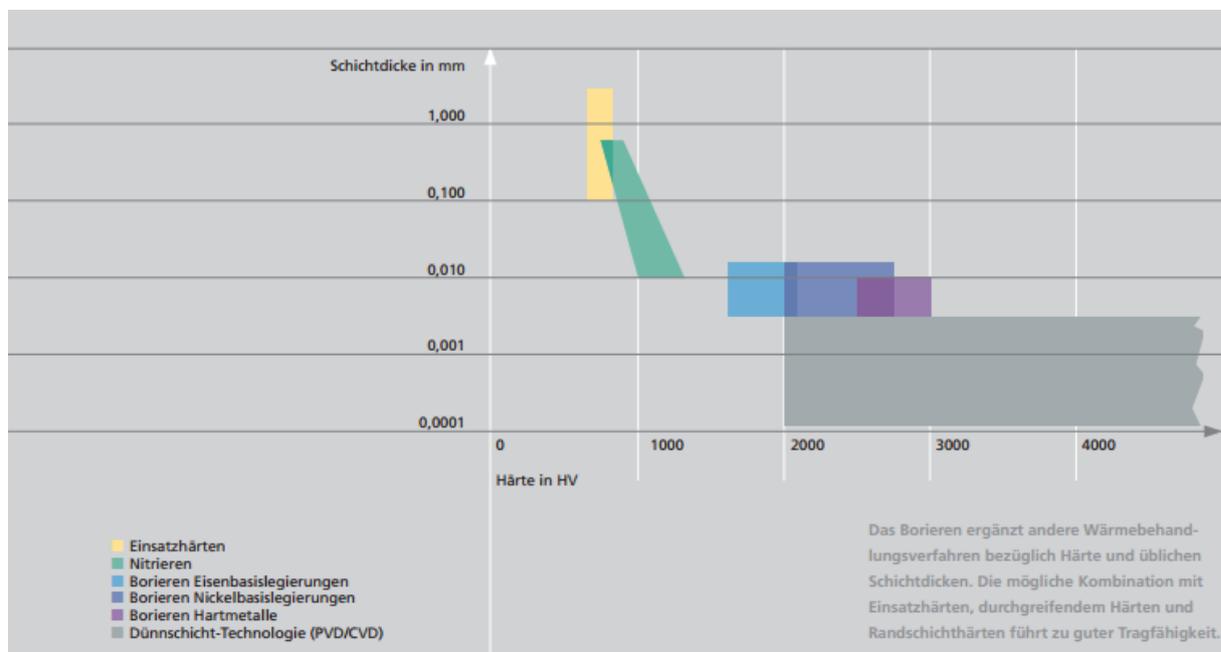


Abbildung 44: Oberflächentechnologien: Schichtdicke zu möglicher Härte

Aus dieser Grafik ist ersichtlich, dass Dünnschicht-Technologien eine äußerst hohe Härte erreichen. Leider sind diese Schichten, wie der Name schon sagt, sehr dünn, wodurch es bei Überlasten zum Versagen dieser Schichten kommen kann. Sie sind auch wesentlich teurer, wie zum Beispiel das Einsatzhärten oder das Nitrieren.

Vergleicht man die Thermochemischen Verfahren mit dem Vergüteten Zustand (Durchgehärtet), werden die Schichten vom Einsatzhärten bis zum Borieren hin immer dünner. Die Härte steigt dafür beim Borieren auf ein sehr hohes Niveau an der Werkstoffoberfläche an. Abbildung 45 soll das verdeutlichen.

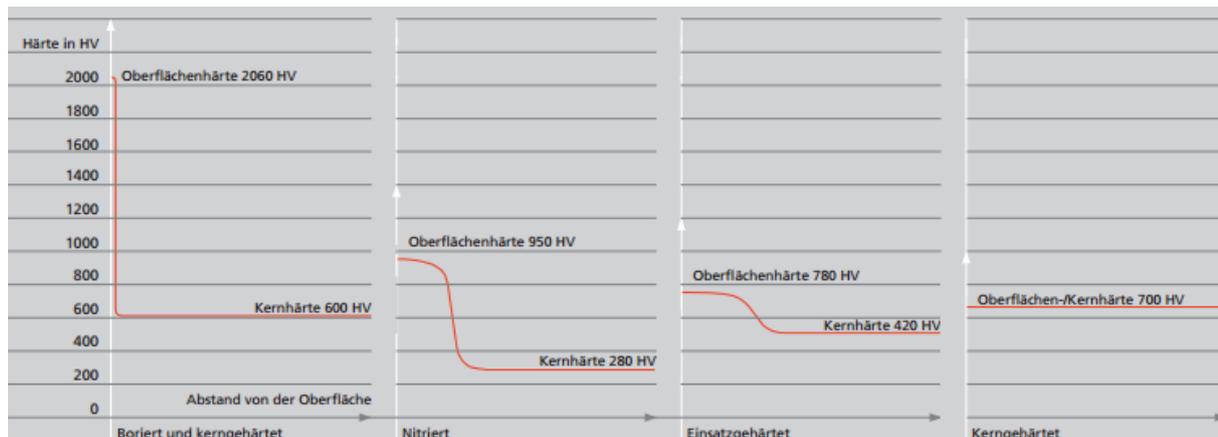


Abbildung 45: Härtevergleiche, Thermochemische Verfahren vs. Vergüten

Aus Abbildung 45 ist sehr schön ersichtlich, dass Einsatzhärten zwar nicht die höchste Härte erreichen kann, jedoch aber einen schön gleichmäßigen Übergang zur Kernhärte besitzt. Boridschichten im Vergleich können doch sehr spröde sein und bei Überlasten abplatzen. Wenn etwas vergütet ist, hat man eine gleichmäßige Härteverteilung, die Härte ist aber nicht besonders hoch bei einem niedrigen Kohlenstoffgehalt. Ein hoher Kohlenstoffgehalt würde zwar die Härte erhöhen, der Werkstoff wäre aber so spröde, dass man diesen nicht effektiv für dynamische Belastungen, wie sie im Kettenbetrieb auftreten, einsetzen kann.

Zusammenfassend soll nochmal erläutert werden, warum man sich für das Einsatzhärten der beiden Werkstoffe entschieden hat. Zum einen ist der wirtschaftliche Faktor ein entscheidender, bei der Herstellung von vielen Ketten wäre es nicht wirtschaftlich Dünnschicht-Technologien oder ähnliches einzusetzen. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Umgebung und die Belastung, der die Kette ausgesetzt ist. Die Schicht sollte schon einen gleichmäßigen Verlauf zur Kernhärte hin haben, dadurch hat man eine wichtige Duktilität, die der Werkstoff bei wechselnden dynamischen Belastungen besitzen muss. Man kann bei einer Kette keine schlagartigen Härtewechsel, wie es bei Boridschichten oder ähnlichen Verfahren auftritt, gebrauchen. Es genügen geringe Überlasten die

mehrmals auftreten und das Kettenglied würde mit der Zeit aufgrund des Verschleißes versagen. Diese Überlasten würden die Schichten mit der Zeit durch Pitting oder anderen Belastungserscheinungen abplatzen lassen und der Verschleiß würde an diesem Bauteil enorm zunehmen.

5.2 Mögliche Versuchseinrichtungen

Es gibt eine Vielzahl von Prüfständen um Ketten hinsichtlich ihrer Gebrauchstauglichkeit zu überprüfen. Angefangen von Tribometrie-Prüfständen, über Zugversuche bis hin zu Oberflächenätzungen, um sich den Materialabtrag aufgrund von gewissen Umgebungsmedien ansehen zu können. Auch zerstörungsfreie Prüfmethode, wie zum Beispiel das Ultraschallprüfverfahren, kann angewandt werden um Kettenglieder auf ihre werkstofftechnische Gleichmäßigkeit zu untersuchen. Für die Versuchsreihe in dieser Arbeit werden die Kettenglieder einem Zugversuch unterzogen und zum anderen wird man mit einem Schwenktribometer sich den Materialabtrag zwischen den Kettengliedern ansehen und sich dabei auf die Werkstoffe und auf die Geometrie spezialisieren.

5.2.1 Zugversuch

Der Zugversuch ist ein genormtes Standardverfahren der Werkstoffprüfung zur Bestimmung der Streckgrenze, der Zugfestigkeit und weiterer Werkstoffkennwerte. Er ist ein quasistatisches, zerstörendes Prüfverfahren. Es geschieht meist unter einer einachsigen Belastung und bei konstanter Temperatur. Es wird ein glatter, d.h. ungekerbter Prüfstab in eine Zugprüfmaschine eingespannt und in Richtung der Stabachse mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit bis zum Zerreißen gedehnt. In der Technik ist es häufig von großer Bedeutung, die Eigenschaften eines verwendeten Materials hinsichtlich seiner Festigkeit, seiner Plastizität bzw. seiner Sprödigkeit, seiner Elastizität und einiger anderer Eigenschaften genau zu kennen. [60]

Zu diesem Zweck werden Materialproben im Zugversuch getestet, indem die Probe mit bekanntem Ausgangsquerschnitt in eine Zugprüfmaschine eingespannt und mit einer Zugkraft belastet wird.

Unter Erhöhung der Kraft wird diese dann über der verursachten Längenänderung grafisch dargestellt. Diese Kurve bezeichnet man als Kraft-Verlängerungs-Diagramm.

Um eine Messkurve zu erhalten, die nur von der Art und Struktur des geprüften Materials, also nicht von den geometrischen Abmessungen der Probe abhängt, verwendet man reduzierte Einheiten, das heißt die Längenänderung wird auf die Anfangslänge und die Kraft auf den senkrechten Querschnitt des Körpers im undeformierten Zustand bezogen. Diese jetzt von der Probenform unabhängige Kurve nennt man Spannungs-Dehnungs-Diagramm.

ϵ =Längenänderung/Anfangslänge..... Dehnung

σ = Kraft/Anfangsquerschnitt.....Spannung

Je nachdem, ob man den Versuch spannungsgeregelt oder dehnungsgeregelt fährt, ist die Spannung bzw. die Dehnung die unabhängige Variable. Es hat sich jedoch eingebürgert, immer die Spannung über der Dehnung aufzutragen. Die technische Spannung bezieht sich immer auf den Ausgangsquerschnitt. Die wahre Spannung steigt jedoch im Zugversuch ab der Zugfestigkeit weiter an, da sich die Querschnittsfläche aufgrund von der Einschnürung verringert. Die wahre Spannung kann allerdings nicht direkt mit dem Zugversuch ermittelt werden, daher verwendet man fast immer die technische Spannung. Abbildung 46 zeigt, wie so eine Zugprüfmaschine aussehen kann, womit man solche Zugversuche machen kann.[60]



Abbildung 46: Zugprüfmaschine

Abbildung 47 zeigt noch den Unterschied zwischen dem wahren und dem technischen Spannung-Dehnungs-Diagramm (scheinbares Diagramm).

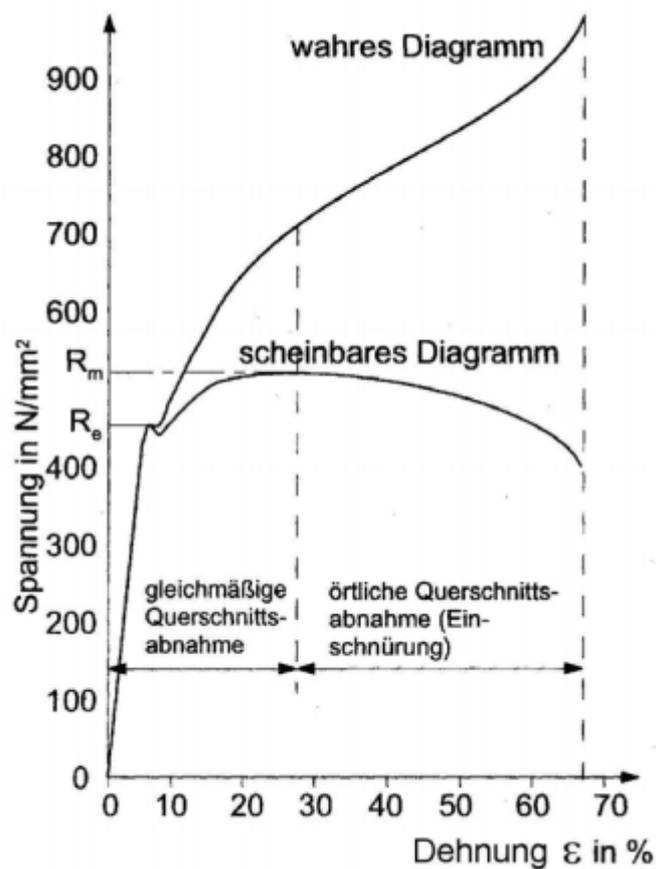


Abbildung 47: Arten des Spannungs-Dehnungs-Diagrammes

Von den Proben her gibt es zwei Arten, die Flachprobe und die Rundprobe, welche in die Zugprüfmaschinen eingespannt werden können. Abbildung 48 verdeutlicht diese.

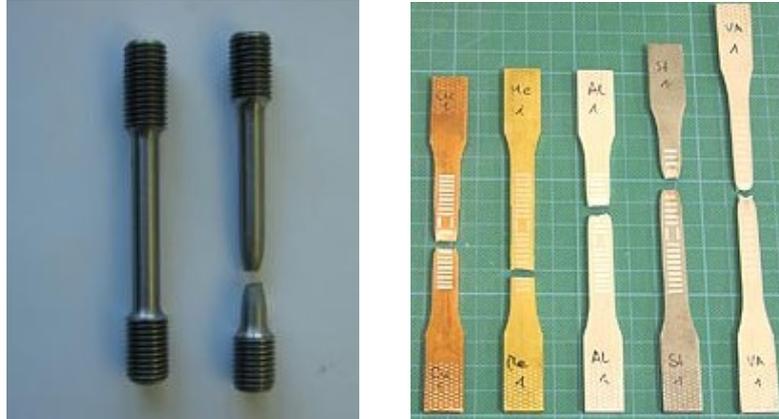


Abbildung 48: Rund -und Flachproben

Um das Spannungs-Dehnungs-Diagramm lesen und verstehen zu können, muss man drei wichtige Bereiche in diesem definieren:

Bereich I: Elastische Verformung

Zu Beginn der Verformung zeigen die meisten Werkstoffe ein ausschließlich elastisches Verhalten, d.h. nach der Entlastung nehmen die Werkstoffe ihre ursprüngliche Form (Länge) wieder ein, die Verformung ist vollständig reversibel. Die Probe verlängert sich, dafür nimmt der Probenquerschnitt über die gesamte Länge gleichmäßig ab (Querkontraktion).[60]

Bereich II: Gleichmäßige plastische Verformung

Nach Überschreiten der Elastizitätsgrenze kommt es zu plastischen, irreversiblen Verformungen, zunächst nur in einzelnen Körnern (Mikroplastizität), später über die gesamte Probenlänge hinweg. Der Probenstab wird länger, dafür nimmt sein Querschnitt über die gesamte Probenlänge hinweg gleichmäßig ab. Die Gesamtverlängerung bei einer bestimmten Zugkraft kann durch die Parallelverschiebung der Hooke'schen Geraden in den elastischen und plastischen Anteil zerlegt werden. Die plastische Verformung ist immer ein lokaler Prozess, d.h. sie erfolgt örtlich und zeitlich begrenzt immer nur an einzelnen Stellen der Probe und resultiert aus der Verschiebung von Atomlagen gegeneinander.

Ermöglicht und ganz wesentlich erleichtert wird die Verschiebung der Atomlagen durch das Gleiten von Versetzungen im Kristallgitter. Mit steigender plastischer Verformung wird der Werkstoff immer härter (Kaltverfestigung). Es müssen immer größere Kräfte aufgebracht werden, um eine weitere plastische Verformung zu erreichen.[60]

Bereich III: Plastische Verformung mit Einschnürung der Probe

Beginnend mit dem Erreichen des Kraftmaximums schnürt sich die Probe an einer Stelle ein, die weitere plastische Verlängerung der Probe bis zum Bruch resultiert ausschließlich aus dem Bereich der Einschnürung. Die Dehnung nimmt noch etwas zu, die Kraft verringert sich von der Zugfestigkeit ausgehend ein bisschen und schlussendlich versagt die Probe (Bruch).[60]

Abbildung 49 zeigt diese drei verschiedenen Bereiche.

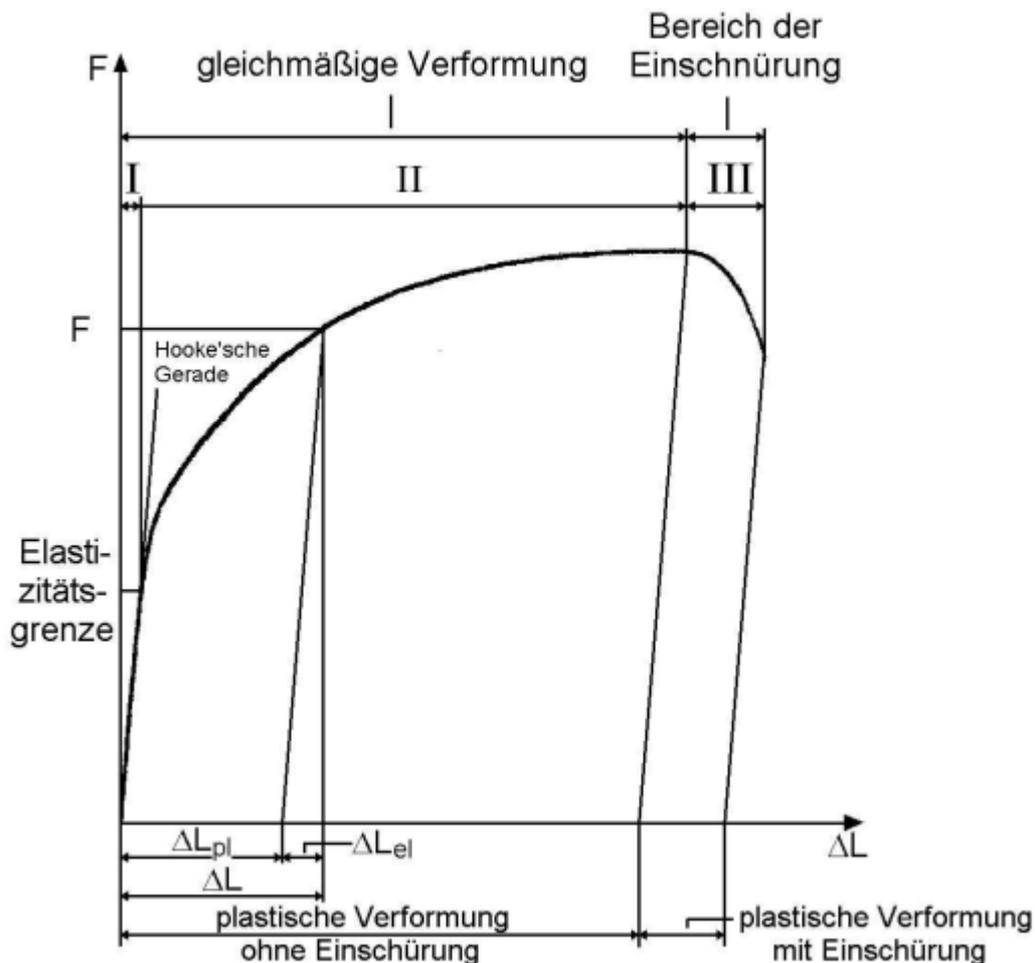


Abbildung 49: Verformungsbereiche im Spannungs-Dehnungs-Diagramm

ΔL_{pl} = den Anteil der plastischen Längenänderung

ΔL_{el} = den Anteil der elastischen Längenänderung

ΔL = die gesamte Längenänderung

F = die aufgebrachte Kraft

Es gibt verschiedene Brucharten, je nach Material unterschiedlich. Abbildung 50 gibt einen Einblick in diese Brucharten.

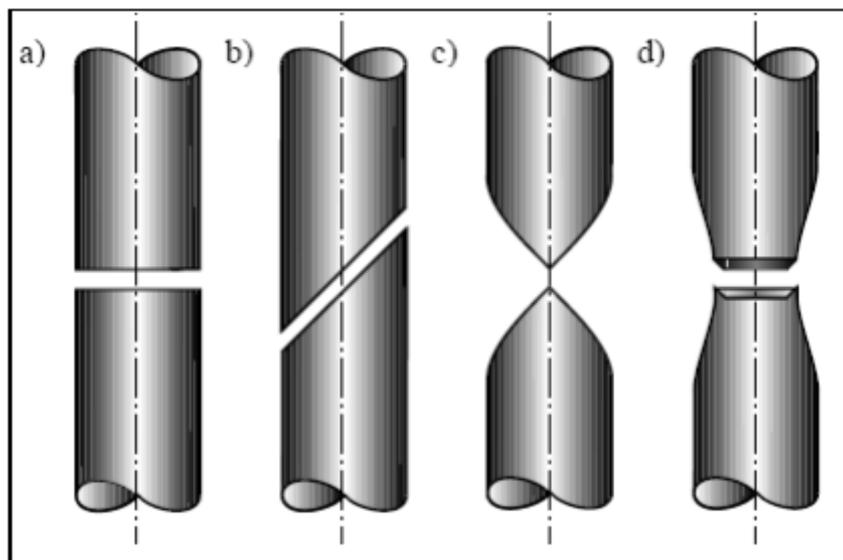


Abbildung 50: Zugversuchsproben, Brucharten

- a) Trennbruch
- b) Scherbruch
- c) Einschnürbruch
- d) Mischbruch

Abbildung 51 zeigt zu guter Letzt noch ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit ausgeprägter Streckgrenze während Abbildung 52 ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit einem kontinuierlichen Fließbeginn darstellt.

R_m = Zugfestigkeit

R_{eH} = Obere Streckgrenze

R_{eL} = untere Streckgrenze

$R_{p0,2}$ = Dehngrenze mit 0,2% plastischer Dehnung

E = Elastizitätsmodul ($=\Delta\sigma/\Delta\epsilon$)

A = Bruchdehnung

A_g = Gleichmaßdehnung

A_L = Lüdersdehnung

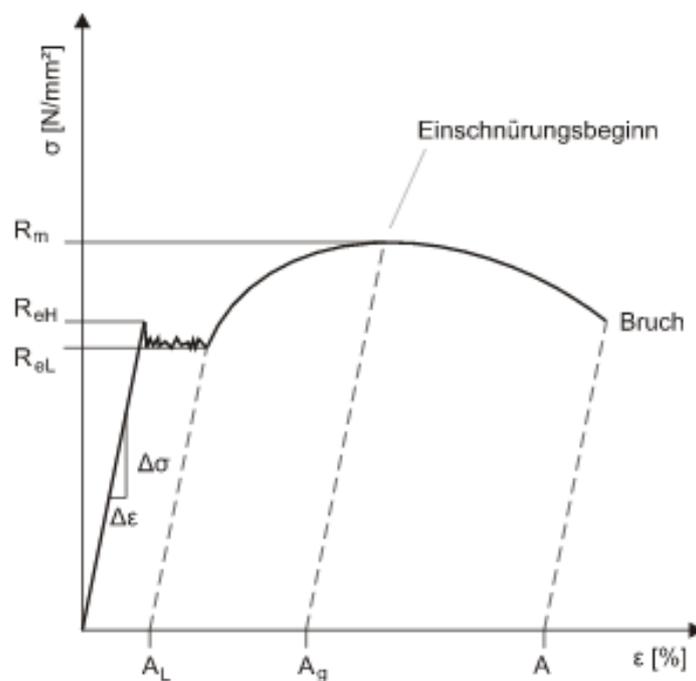


Abbildung 51: Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit ausgeprägter Streckgrenze

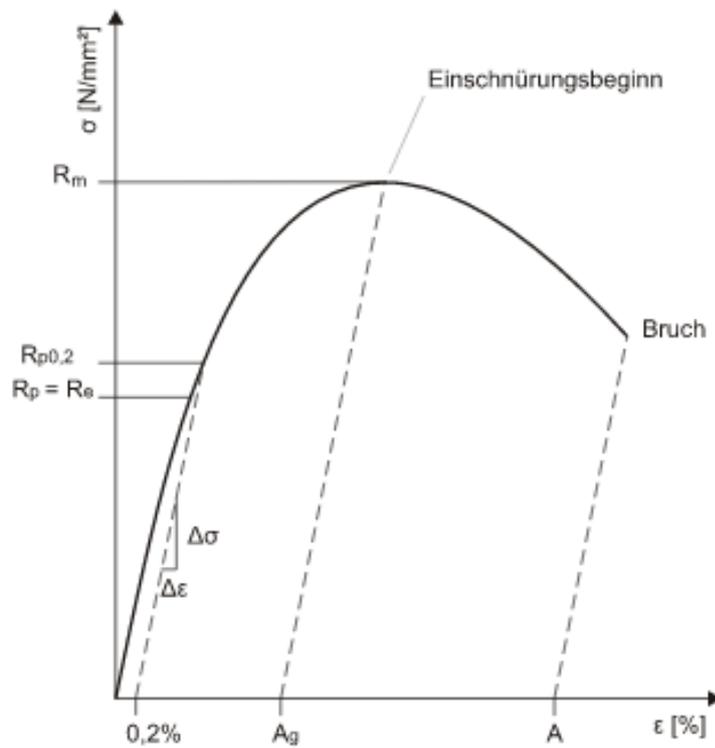


Abbildung 52: Spannungs-Dehnungs-Diagramm ohne ausgeprägte Streckgrenze

5.2.2 Tribometer und Tribometrie

Tribometer sind Geräte zum Messen von Reibung und Verschleiß, also von Größen in der Tribologie, was das Hauptgebiet dieser Arbeit ist. Aufgrund der äußerst vielfältigen Fragestellungen in der Tribologie sind über die Jahre zahlreiche Tribometer für bestimmte Anwendungsfälle und Messaufgaben entwickelt worden. Die Interpretation und Übertragbarkeit von auf Tribometern gewonnenen Ergebnissen ist wissenschaftlich anspruchsvoll. Aufgrund der Komplexität tribologischer Systeme, der wirkenden Prozesse und einer Vielzahl beeinflussender Parameter, müssen Reibungs- und Verschleißprüfungen eine große Anzahl von Einflussgrößen berücksichtigen. Je nach Aufgabenstellung werden die zu untersuchenden Materialpaarungen rotatorisch (z. B. Stift/Scheibe-Tribometer) oder translatorisch belastet (z. B. Schwing-Reibverschleiß-Prüfstand). Roll- und Wälzbewegungen können beispielsweise mit Zwei-Scheiben-Prüfständen simuliert werden. Großer Vorteil der Laborprüfgeräte ist, dass die Beanspruchungsparameter definiert variiert werden können (Kraft, Relativgeschwindigkeit, Schmierung, Temperatur etc.).[61]

Man kann komplette Maschinen und Anlagen unter realen Betriebsbedingungen prüfen, oder schlicht Modellprüfungen mit einfachen Probekörpern. Es gibt die verschiedensten Verschleißprüfstände, angefangen bei Prüfständen für Prall- und Abrasionsverschleiß, oder wie oben erwähnt rotatorische oder lineare Prüfstände um Materialpaarungen zu untersuchen und noch viele mehr. Man kann tribologische Phänomene auch in einer Simulationssoftware implementieren und sich so zum Beispiel den Prallverschleiß bei einer Prallplatte eines Förderbandes ansehen. Eine Verschleißsimulation wird in Abbildung 53 dargestellt.

Auch Nanotribometer werden immer häufiger eingesetzt, mit Hilfe dieses Gerätes ist es möglich, Normalkräfte in einem Bereich von 500 μN bis 1 N einzustellen. Die Messanordnung des Nanotribometers entspricht einer Kugel-Scheibe-Anordnung.[61]

Ein etwas modernerer und auch vielseitigerer Verschleißprüfstand, ist in Abbildung 54 dargestellt.

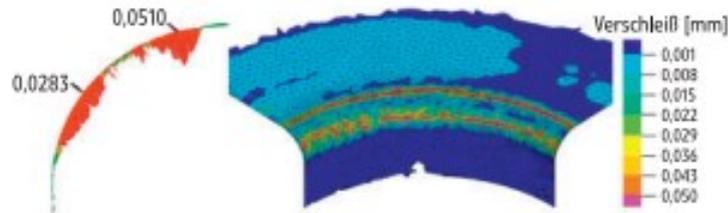


Abbildung 53: Verschleißsimulation

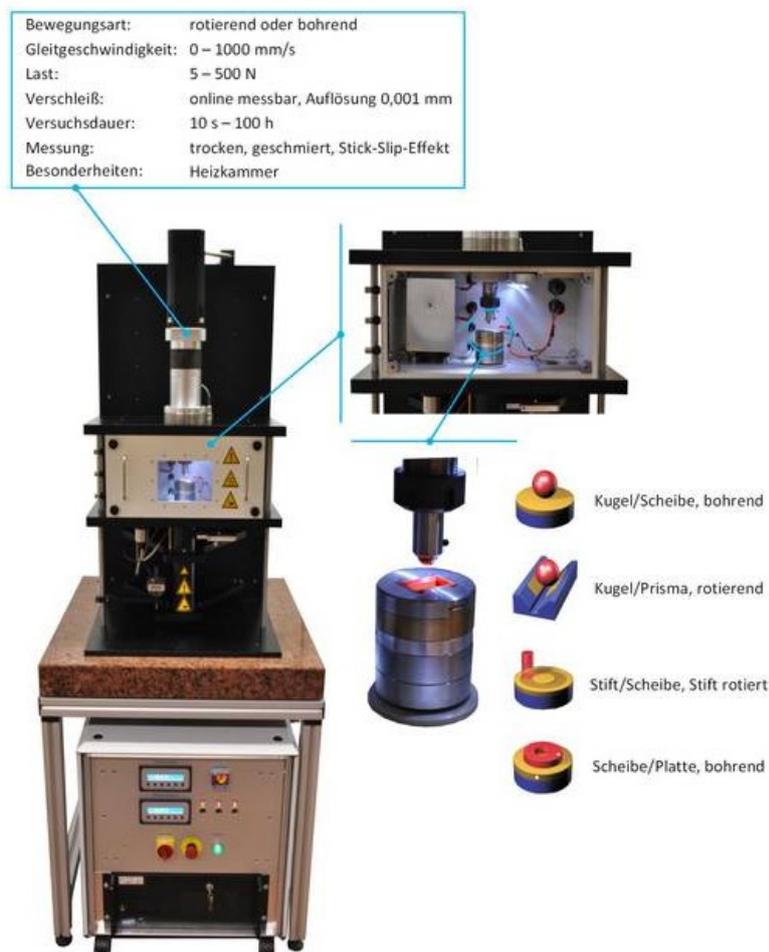


Abbildung 54: moderner Verschleißprüfstand (Tribometer)

Solche Prüfstände sind in der Lage mehrere Bewegungsarten durchzuführen, dieser hier in Abbildung 70 kann bohrend oder rotierend bewegt werden. Es gibt auch Prüfstände, welche translatorisch und rotatorisch betrieben werden können, solche sind aber weit teurer.

Es gibt folgende Bewegungsformen: Rotieren, Wälzen, Schlagen, Oszillieren, Bohren, Translation, Gleiten, Rollen, etc..

Die Messdaten die man erhält beinhalten zum Beispiel die Materialabtragsrate aufgetragen über die Zeit, oder auch Verschleißtiefe über die Hubanzahl. Man kann mit Tribometern auch die Haftreibung und die Gleitreibung ermitteln. Dieses Messen des Verschleißes und auftragen in Diagrammen nennt man auch Tribometrie.

Abbildung 55 zeigt noch das Schemata zweier Abrasivprüfstände, einen rotierenden und einen translatorischen (Lineartribometer).

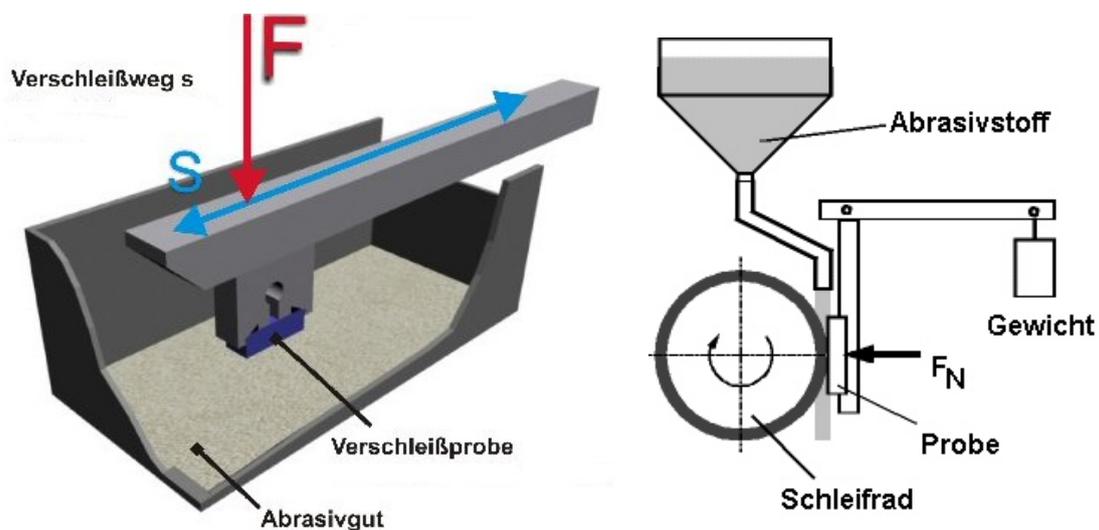


Abbildung 55: Abrasivprüfstände: rechts: translatorisch, links: rotatorisch

5.2.2.1 Lineartribometer 1 an der Montanuniversität Leoben

Eine Möglichkeit für die Versuche der Verschleißprüfungen der Kettenglieder in dieser Arbeit, ergibt sich an der Montanuniversität Leoben, am Institut für Fördertechnik und Konstruktionslehre. Abbildung 56 soll diesen Lineartribometer ersichtlich machen.

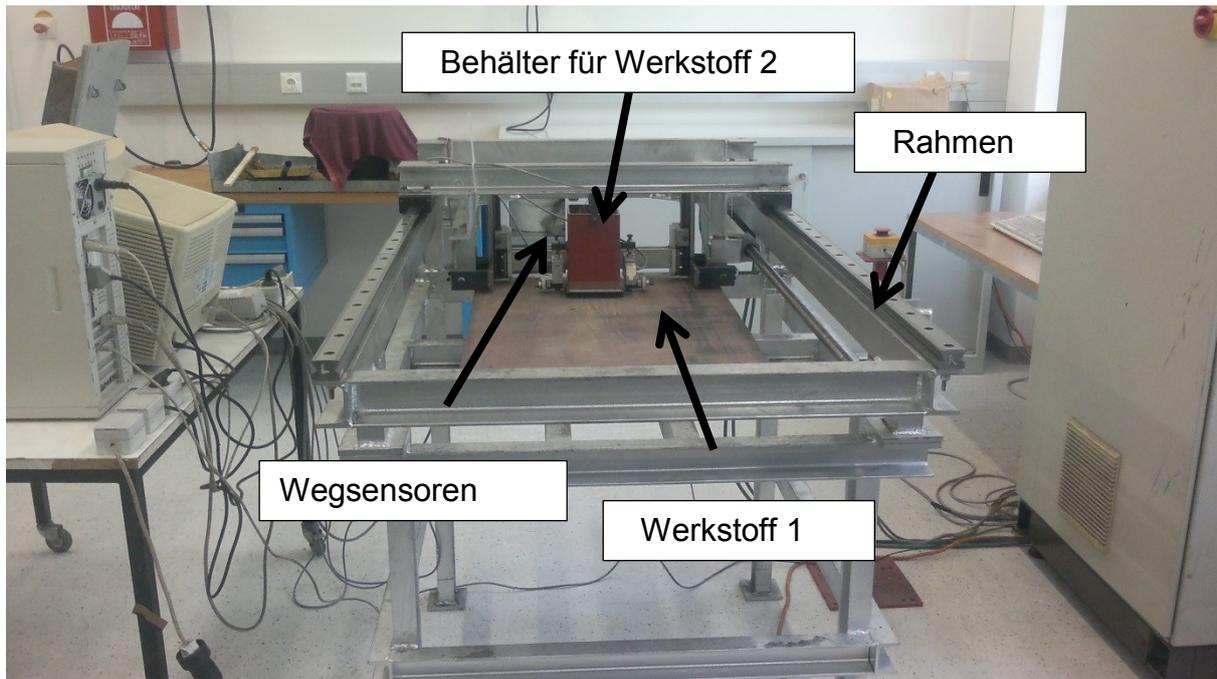


Abbildung 56: Lineartribometer an der MU-Leoben

Dieser recht simple aufgebaute Verschleißprüfstand ist Anfangs für abrasiven Verschleiß konzipiert worden, er müsste also ein wenig umgebaut werden um die Kettenwerkstoffe zu prüfen. Man kann hier die Kettengliederaußenseite prüfen, nicht aber die Kettengliederberührfläche. Durch seinen einfachen Aufbau ist er aber recht effektiv, weil man schnell, mehrere Arten des Verschleißes prüfen kann. Entweder abrasiven Verschleiß, oder wie Materialpaarungen aufeinander einwirken, dieser Prüfstand ist schnell umgebaut. Den Verschleiß kann man leicht messen, indem man vor dem Versuch und nach dem Versuch, jeweils das Gewicht des Prüfkörpers misst, so kann man die Abtragsrate pro Zeiteinheit berechnen. Das einzige Problem an diesem Verschleißprüfstand ist, dass er aufgrund seines Alters eine neue Programmierung der Wegsteuerung benötigt, um dem Prüfstand so den Gleitweg vorzugeben. Will man wissen, wie eine Materialpaarung aufeinander einwirkt, muss man von dem

einen Werkstoff, den „Werkstoff 1“, eine Platte anfertigen lassen, diese wird dann auf dem Rahmen des Verschleißprüfstandes befestigt. Durch eine Einspannvorrichtung, könnte man den „Werkstoff 2“ in dem Behälter, wo sich normalerweise das Abrasivmaterial befindet, fixieren und so die beiden Werkstoffe auf ihre gegenseitige Abnutzung untersuchen. Die Normalkraft wird mittels Gewichten aufgebracht.

5.2.2.2 Lineartribometer 2 an der Montanuniversität Leoben

Die zweite Möglichkeit, die sich an der Montanuniversität Leoben am Institut für Fördertechnik und Konstruktionslehre befindet, ist ein wesentlich modernerer Prüfstand als der Lineartribometer 1. Abbildung 57 zeigt diesen.

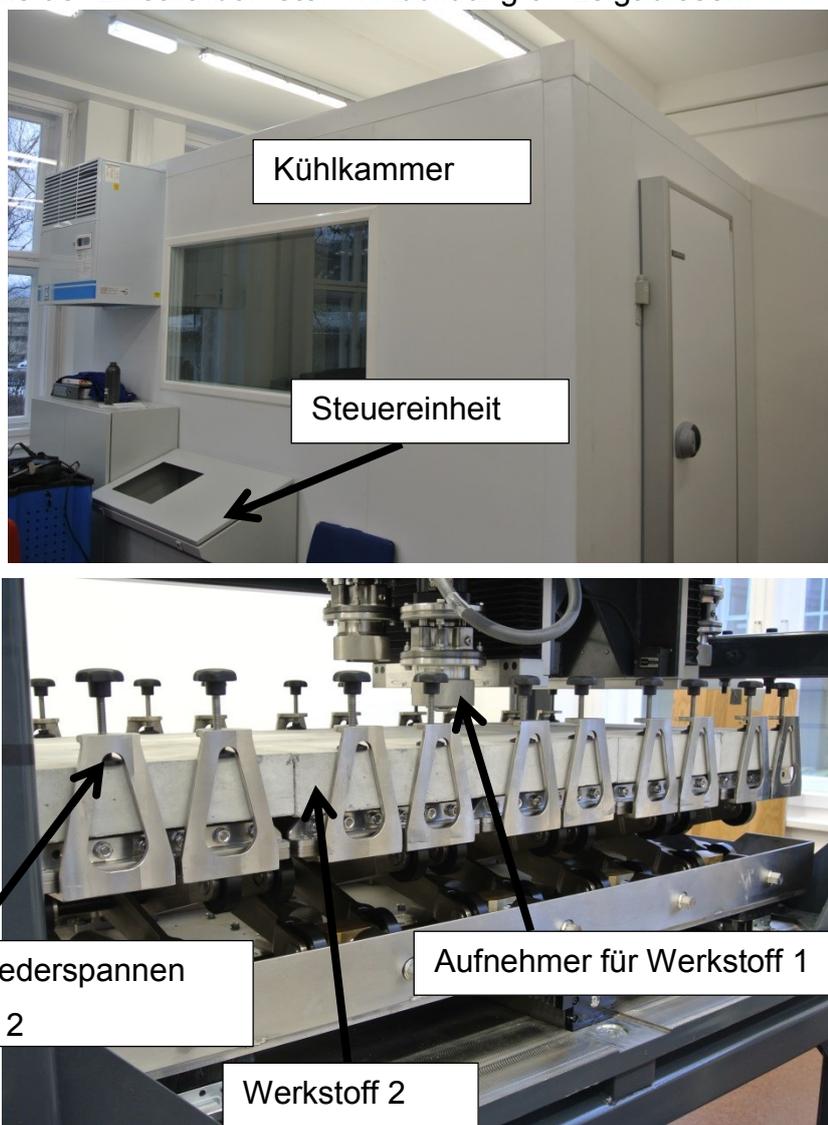


Abbildung 57: Lineartribometer 2 an der MU-Leoben

Dieser Linearprüfstand für Verschleiß ist in einer Kühlkammer eingebaut, um auch Verschleiß bei niederen Temperaturen untersuchen und messen zu können, bis ungefähr minus 25°C. Ein weiterer Vorteil dieses Prüfstandes ist, dass man bis zu vier Verschleißprüfungen gleichzeitig durchführen kann, da er vier Aufnehmer für die Prüfkörper hat. Die Proben für die Aufnehmer müssen eine gewisse Geometrie besitzen. Abbildung 58 zeigt so einen Aufnehmer und einen dazugehörigen Prüfkörper.

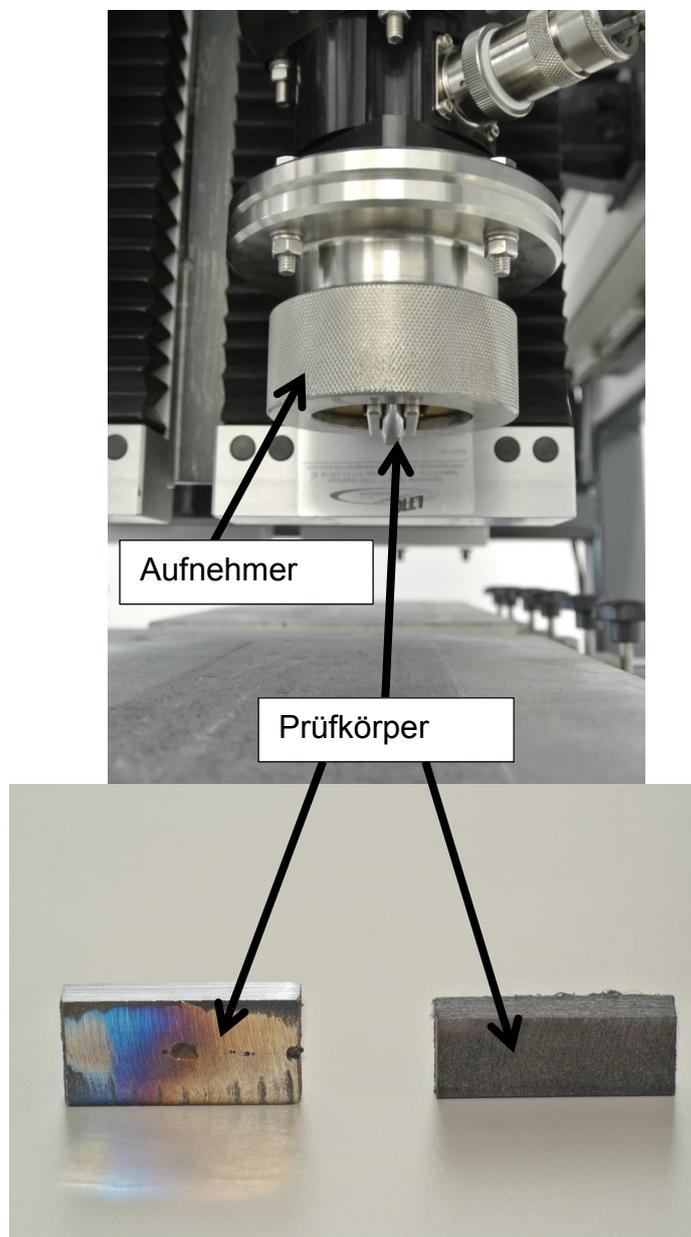


Abbildung 58: Aufnehmer und Prüfkörper für
Lineartribometer 2



Man könnte also auch bei diesem Tribometer wieder nur den Kettengliedaußenverschleiß messen, den die Kette erleidet, indem sie zum Beispiel am Maschinenrahmen entlangschleift und nicht den Verschleiß den die Kettenglieder einander zufügen. Gemessen wird wieder das Gewicht, welches die Prüfkörper aufgrund des Verschleißes verlieren, daraus kann man wieder die Abtragsrate über einen bestimmten Zeitraum angeben. Parameter für diesen Prüfstand, die man variieren kann sind Gleitweg, Temperatur und Normalkraft. Der „Werkstoff 2“ kann ebenso für alle vier Versuche, die nebeneinander ablaufen, variiert werden, da dieser Prüfkörper mit Zwingen niedergespannt wird.

5.2.2.3 Schwenktribometer bei der Firma Pewag

Um die Erklärung für den Schwenktribometer zu vereinfachen, folgt mit Abbildung 59 dieser Verschleißprüfstand. Für die Versuchsreihe wird er als Verschleißprüfstand verwendet. Da man mit den beiden vorigen Tribometern nur den Verschleiß an den Außenseiten der Ketten prüfen kann, nicht aber den Verschleiß an den Berührflächen der Kettenglieder, ist ein Versuch mit einem Schwenktribometer die logische Wahl.



Abbildung 59: Schwenktribometer der Fa. Pewag

Das Wirkprinzip dieses Tribometers ist so einfach wie effektiv, über einen Exzenter, der sich im unteren Teil des Prüfstandes befindet, wird der bewegliche Teil der Maschine auf und ab bewegt (siehe weißer Doppelpfeil in Abbildung 59). Durch diese Bewegung kann man das Verschleißverhalten, das die beiden Kettenglieder einander zufügen (zum Beispiel in einem Becherwerk), nachstellen. Je nachdem wie man den Exzenter verstellt, kann man den maximalen Winkel der Bewegung vorgeben. Es werden drei Kettenglieder als Probe miteinander verschweißt und dann in die Prüfmaschine eingespannt (Abbildung 60).

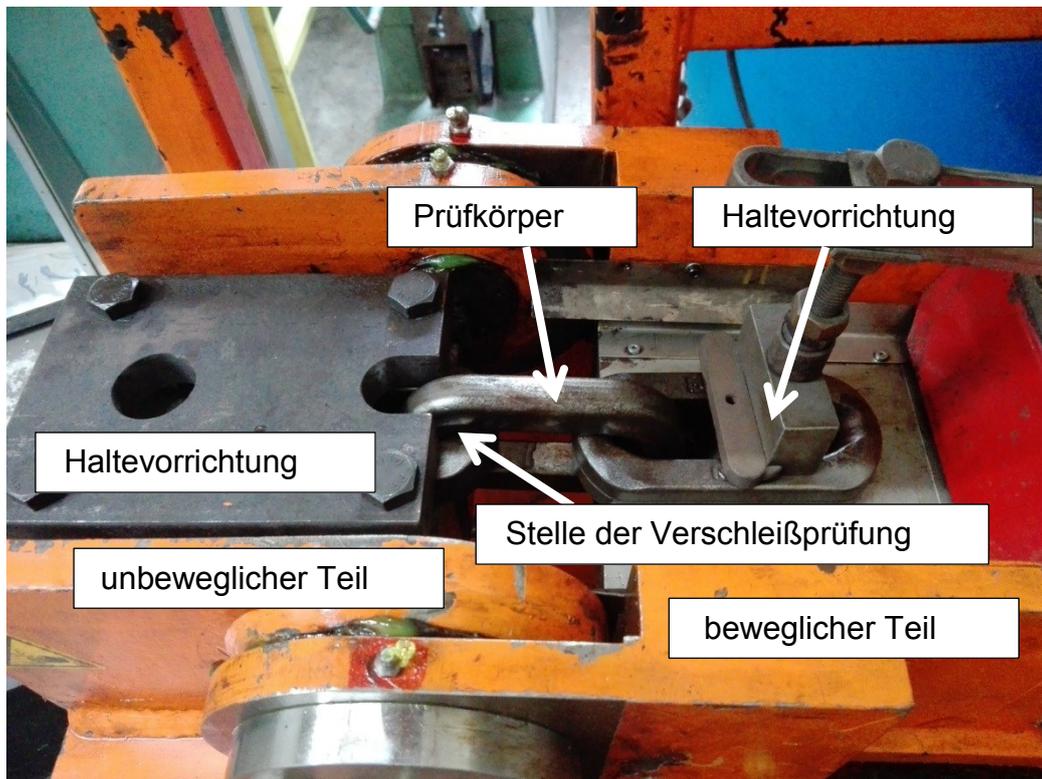


Abbildung 60: Einbau des Prüfkörpers in den Verschleißprüfstand

Auf der unbeweglichen Seite erfolgt die Einspannung mit einer Abdeckung die vierfach verschraubt ist, auf der beweglichen Seite sorgt eine abwinkelbare Vorrichtung (Kniehebel) (Abbildung 59) dafür, dass der Prüfkörper nicht rausspringen kann. Die Anpresskraft, die auf die Kettenglieder in der Realität wirkt (z.B. Becherwerk), wird über eine Hydraulikvorrichtung aufgebracht und kann somit auch variiert werden. Es besteht die Möglichkeit, dass man mit dieser Maschine die Anzahl der Zyklen mitzählt, oder auch eine gewisse Hubanzahl fährt, dann pausiert der Prüfstand für eine gewisse Zeit und dann fährt er wieder eine gewisse Hubanzahl. Auf diese Weise soll es ermöglicht werden, dass man die Versuche noch näher an die Realität heranführen kann, umso den Verschleiß für das jeweilige Einsatzgebiet noch genauer vorhersagen zu können. Aus diesem Grund könnte man mit diesem Verschleißprüfstand auch noch abrasives Material in gewissen Zeitabständen zwischen die Kettenglieder, während des Versuches, einbringen (Abbildung 61), um Staub oder ähnliches nachzustellen. Leider folgt mit solchen realitätsnahen Versuchen auch immer eine gewisse Problematik, zum Beispiel wird der Prüfstand erheblich stärker belastet, weshalb man eher auf konventionelle Verschleißprüfungen zurückgreift.

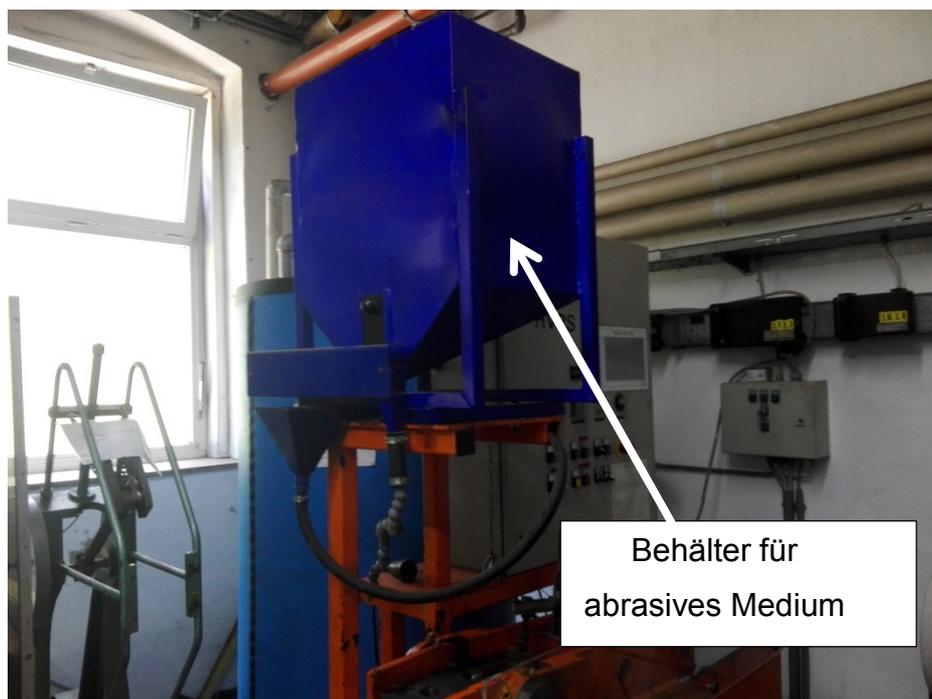


Abbildung 61: Behälter für abrasives Medium

Über die Steuereinrichtung kann man die Hydraulik für die Anpresskraft steuern, sowie auch die Anlage an sich. Um den Druck der Hydraulikvorrichtung, der in Bar angegeben wird, auf die Anpresskraft umzurechnen, gibt es eine lineare Tabelle die dies vereinfacht. Man kann am Steuergerät die Anzahl der Zyklen ablesen und auch die Hubanzahl, falls man vorhat Pausen zwischen den einzelnen Perioden einzubauen, umso die Kette noch Realitätsgetreuer zu testen. Abbildung 62 bildet diese Steuereinrichtung des Verschleißprüfstandes ab.

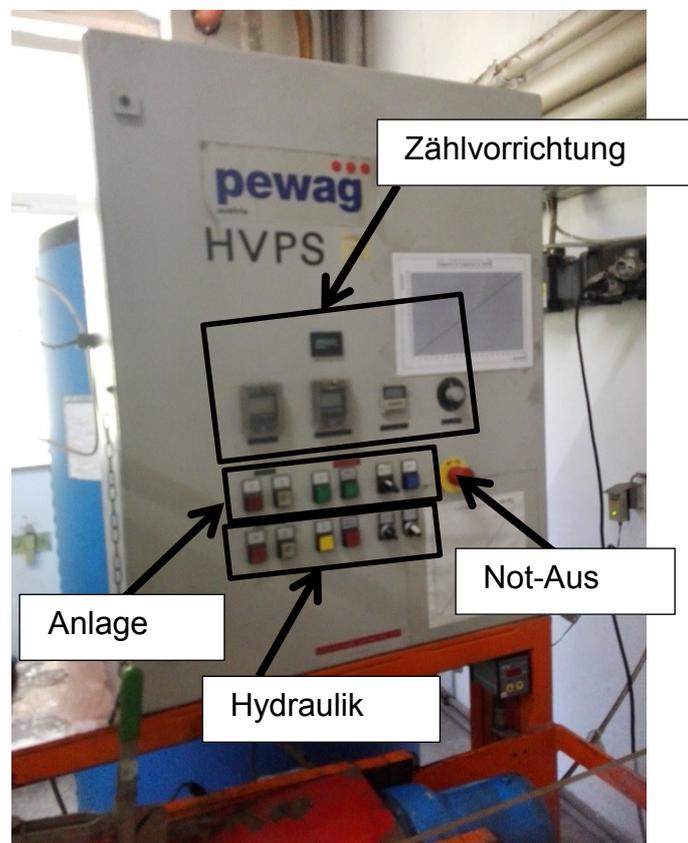


Abbildung 62: Steuerstand des Schwenktribometers

Je nachdem wie lange man einen Prüfkörper in der Maschine eingespannt lässt, entsteht ein Verschleiß. Man kann 10 Zyklen laufen lassen, oder auch 500000 Zyklen, je nachdem welchen Einsatzort die Kette hat bzw. auch welche Werkstoffparameter.

Die Kettenglieder schädigen einander durch die gemeinsame Reibung, diese ist umso höher, je höher die Anpresskraft ist. Man muss vor Versuchsbeginn die Parameter Anpresskraft und Anzahl der Zyklen wählen, damit man die verschiedenen Prüfkörper miteinander vergleichen kann. Um den Verschleiß zu messen, kann man entweder die Längenänderung bei Maximalbelastung als Verschleißmaß heranziehen, oder man kann die Prüfkörper wiegen und so das Gewicht als Verschleißmaß nehmen. Abbildung 63 zeigt noch einen Prüfkörper, den man in diesen Prüfstand einbauen kann.



Abbildung 63: Prüfkörper für Schwenktribometer der Fa. Pewag

5.2.3 Versuche

Es gibt drei Hauptgruppen um den Verschleiß zu prüfen:

1. Modellverschleißprüfungen
2. Betriebsverschleißprüfungen
3. indirekte Verschleißprüfungen

Innerhalb der Modellverschleißprüfung wird zwischen universeller, d.h. auf die Gesamtheit aller Verschleißteile und Verschleißvorgänge gerichtete, Prüfung und individueller Verschleißprüfung, die sich auf einen ganz speziellen Verschleißvorgang richtet, unterschieden. Bei den individuellen Verschleißprüfungen versucht man, die praktischen Bedingungen eines Verschleißfalles so realitätsgetreu wie möglich nachzubilden. [62]

Bei der Betriebsverschleißprüfung wird die Verschleißfestigkeit eines Werkstoffes im Betrieb am jeweiligen Anlagenteil ermittelt.

Die Verschleißsimulationsversuche sind dabei nur zur Vorauswahl von Werkstoffen geeignet. Erst Betriebsversuche, oder auch Betriebserfahrungen zeigen die Eignung des Werkstoffs für einen Bestimmten Anwendungsfall. [62]

Die indirekte Verschleißprüfung bezieht sich auf eine bestimmte Werkstoffeigenschaft von überragendem Einfluss auf das Verschleißverhalten, zum Beispiel Härteprüfung oder eine chemische Analyse. [62]

5.2.3.1 Versuchsaufbau mit dem Schwenktribometer der Fa. Pewag

Im Kapitel 5.2.2.3 wurde der Schwenktribometer bereits vorgestellt. Man kann nur nutzbare Daten erhalten, wenn man immer die gleichen Versuchsbedingungen voraussetzt. Das bedeutet man muss bei einem Verschleißprüfstand wie diesem immer die gleiche Hubgeschwindigkeit wählen, sowie auch die gleiche Anpresskraft und auch dieselbe Anzahl der Zyklen. In Abbildung 64 wird erklärt, wo man an der Steuerkonsole die Parameter setzen bzw. verändern kann. Wie in Kapitel 5.2.2.3 schon erklärt, wird der Zugzylinder in der Einheit „Bar“ geregelt, man muss diesen Wert auch so der Maschine vorgeben. Über eine Umrechnungstabelle, die in Abbildung 64 ersichtlich ist, kann man so sehen welche Kraft man braucht und welchen Druck man dafür nehmen muss.

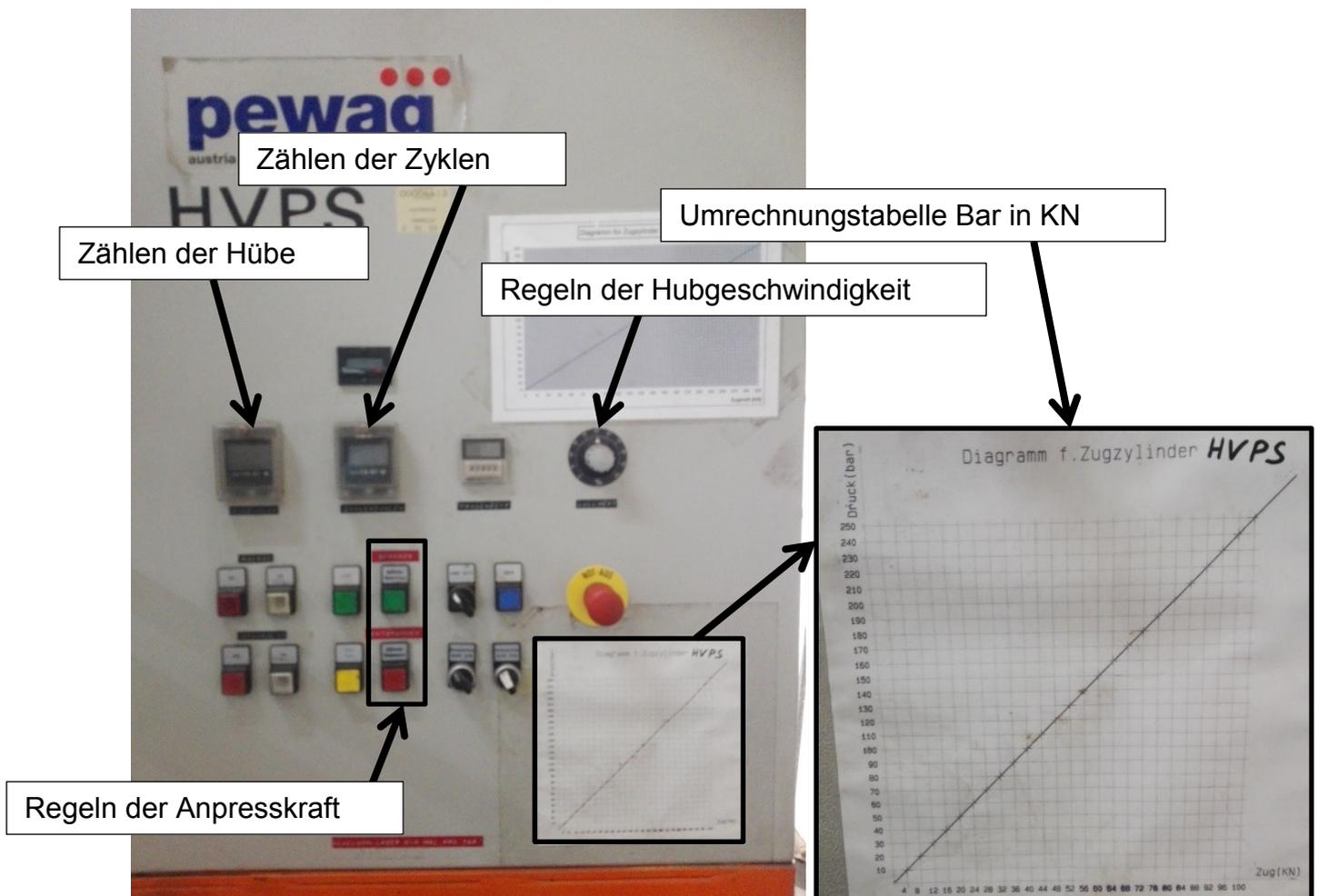


Abbildung 64: Parameter setzen an Steuerkonsole



Probeneinbau:

Um eine Probe einzubauen muss man die verschraubte Platte an der unbeweglichen Stelle des Tribometers lösen und den Kniehebel nach oben klappen. Danach legt man die Probe in die Prüfmaschine und platziert sie korrekt. Als nächstes montiert man die Platte wieder mit den vier vorgesehenen Schrauben und an der beweglichen Seite des Prüfstandes klappt man den Kniehebel wieder herunter. Den Hubzähler kann man mit der „Set-Taste“ auf null zurücksetzen. Der nächste Schritt besteht darin die Hydraulik zu aktivieren, um so über den Druck die Anpresskraft einzustellen (Der Zylinder wird dabei gespannt). Danach schaltet man noch auf die Automatikfunktion und drückt auf „Start“.

Probenentnahme:

Wenn man mit dem Versuch fertig ist, was bei einer Langzeitprüfung des Verschleißes schon mal Wochen dauern kann, muss man die Probe auch wieder entnehmen. Dazu schaltet man die Anlage auf „Aus“ und aktiviert die Hydraulik um den Zylinder entspannen zu können, also die Anpresskraft wegzunehmen. Wenn der Prüfkörper kraftfrei ist kann man die Hydraulik wieder ausschalten. Danach löst man die verschraubte Platte und öffnet den Kniehebel. Jetzt noch die Probe entnehmen und fertig.

Temperaturmessung:

Für den Versuchsaufbau werden die Prüfkörper ein wenig modifiziert. Da für den Verschleiß die Reibung ein wichtiges Thema ist, will man versuchen über die Temperatur herauszufinden wie stark die Reibung ist. Je höher die Temperatur an der Verschleißstelle, desto höher ist dort die Reibung und damit auch der Verschleiß. Es wird versucht, dass man die Temperatur mittels eines sogenannten „Dewetron“ knapp über der Verschleißstelle misst. Während der Prüfkörper in der Verschleißprüfmaschine eingespannt ist und der Verschleiß über die Bewegungsart, der Anpresskraft, der Anzahl der Zyklen und der Hubgeschwindigkeit simuliert wird, versucht man die Temperatur, die aus diesem Verschleißvorgang folgt, zu messen.

So soll auch die ideale Anpresskraft für diesen Versuch gefunden werden. Man will erreichen, dass die Temperatur während dieser Versuche nicht allzu hoch wird. Wenn die Temperatur an der Kontaktstelle der Kettenglieder aufgrund der Reibung zu groß wird kann es passieren, dass die Härteschicht und auch der Grundwerkstoff ihre Härteeigenschaften verlieren (Diffusionsvorgänge, etc.), dadurch kann der Verschleiß stark ansteigen. Einfach gesagt, je höher die Anpresskraft, desto höher ist die Reibung und damit steigt auch die Temperatur was dazu führen kann, dass die Härte an der Oberfläche der Kettenglieder nicht mehr gegeben ist und somit der Verschleiß ansteigt.

Um einen Temperaturmessfühler in die Probe einzubauen, muss man als ersten Schritt ein Loch in die Probe bohren (Abbildung 65).



Abbildung 65: Bohrung für Temperaturmessfühler

In diese Bohrung wird der Temperaturmessfühler mittels eines Klebstoffs eingeklebt, damit der Messfühler während des Versuchs nicht herausgleiten kann. Ein Temperaturmessfühler ist in Abbildung 66 ersichtlich.

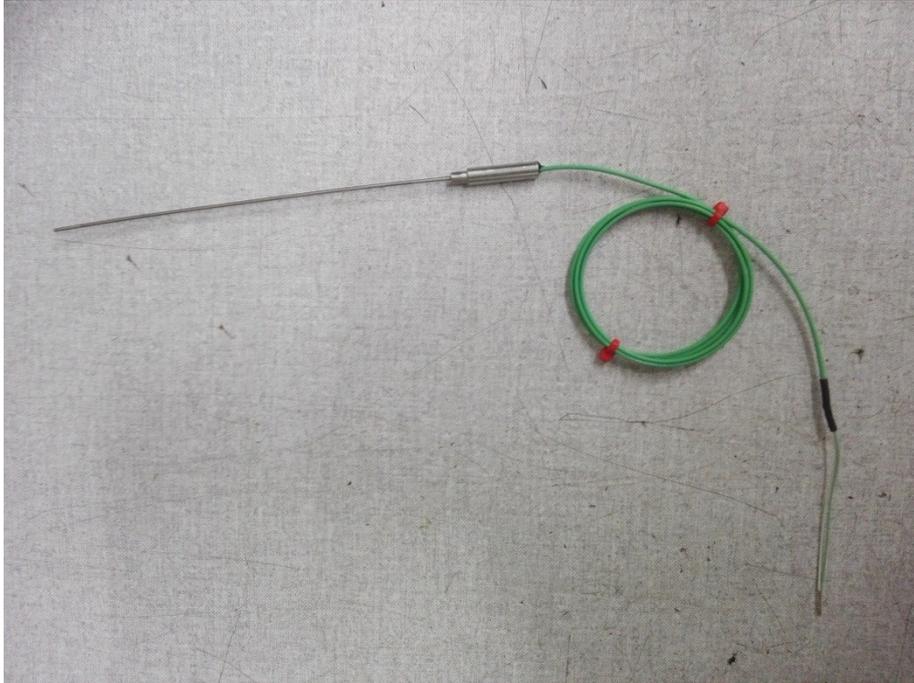


Abbildung 66: Temperaturmessfühler

Wenn die Probe mit dem Temperaturmessfühler fertig präpariert ist (Abbildung 67), kann man sie in den Prüfstand einbauen.

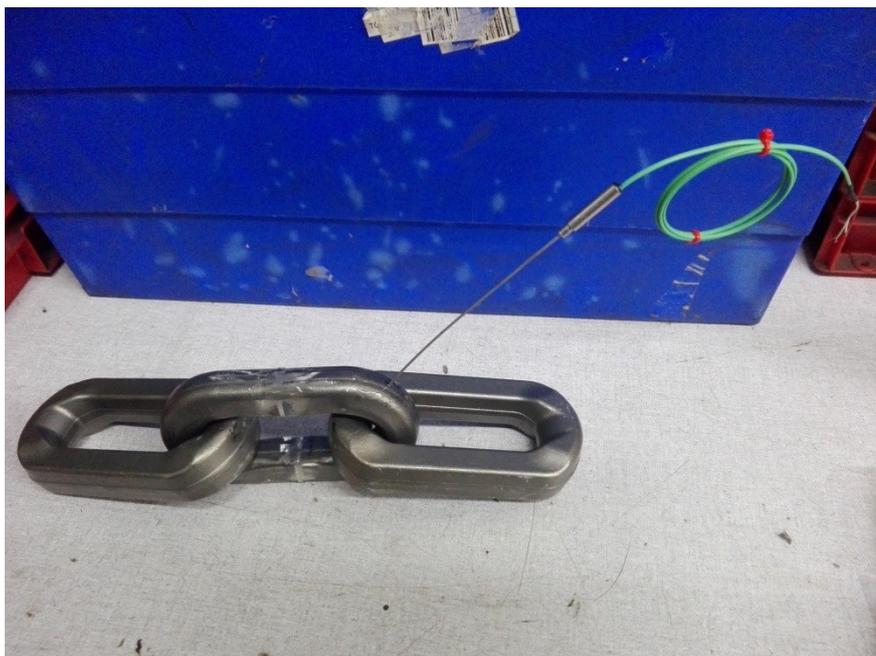


Abbildung 67: Fertige Probe mit Temperaturmessfühler

Den fertigen Probeneinbau sieht man in Abbildung 68.



Abbildung 68: Probe eingebaut in Prüfstand

Wenn das alles erledigt ist kann man den Prüfstand je nach Anzahl der Zyklen und Hubgeschwindigkeit für eine Zeit lang starten. Um das Signal, dass der Temperaturmessfühler abgibt, auch messen und aufzeichnen zu können, wird ein sogenanntes „Dewetron“ benötigt. Ein Dewetron ist ein Computer, welcher eine Vielzahl von Kanälen hat und über diese Kanäle können Signale aufgezeichnet werden. Abbildung 69 zeigt ein solches Dewetron von der Vorder –und Rückseite.

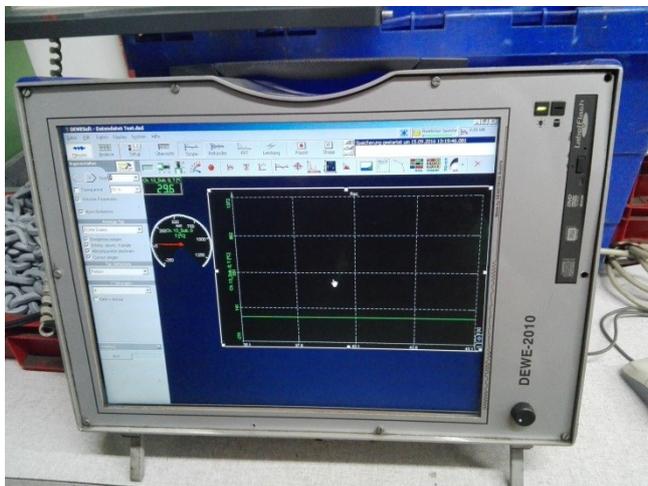


Abbildung 69: Dewetron

Sobald man auf „Aufzeichnen“ drückt werden über diesen Zeitraum alle Temperaturdaten, die der Messfühler abgibt, aufgezeichnet. Nach Beendigung der Aufzeichnung kann man diese Daten genau analysieren, entweder über ein geeignetes Programm wie „Dewe“, oder man kann es auch in eine Excel-Datei exportieren. Es gibt eine Vielzahl von Darstellungseinstellungen, wodurch so ein Gerät mit seiner Software recht effektiv anwendbar ist. Die Temperatur wird über elektrische Signale umgewandelt und ausgegeben. Wie der Prüfstand vor Beginn einer Aufzeichnung aussieht, ist in Abbildung 70 dargestellt.



Abbildung 70: Fertiger Versuchsaufbau

In dieser Arbeit wurde die Temperatur mit 200 Zyklen (400 Hübe) gemessen, bei 60 Kilonewton (KN) und entweder 50%iger, 35%iger oder 30%iger Geschwindigkeit. Die maximale Anpresskraft der Prüfmaschine beträgt 250 bar, das entspricht 100 KN. Die Temperatur wird aber immer wieder auch während des Langzeitversuches gemessen. Man erwartet, dass sich die Temperatur nach einer gewissen Anzahl von Zyklen einer gewissen Konstanz annähert.

Verschleißmessung:

Man bringt den Prüfstand in einen Pausenmodus und stellt ihn gerade (der Prüfstand verfährt in einem 21°-Winkel auf und ab). Die Hydraulik bleibt aus und der Kniehebel wird geöffnet. Als nächstes misst man mit der Schieblehre die Absolutlänge der Kettenprobe (Abbildung 72). Dann stellt man den Hubzähler wieder auf null und schließt den Kniehebel. Man schaltet wieder die Automatikfunktion ein und startet die Prüfmaschine. Das macht man einmal am Tag um die tägliche Längenzunahme zu erhalten und dann trägt man diese Information in das Verschleißprotokoll ein. Daraus resultiert die Verschleißzunahme. Während man bei der Gewichtsmessung, bezogen auf den Verschleiß, mathematisch gesehen nur einen Wert prozentuell errechnen kann, gibt es bei der Verschleißmessung mit der Längenänderung mehrere Möglichkeiten ein Verschleißergebnis zu erhalten. Wichtig ist, dass man immer die gleiche Berechnungsmethode wählt.

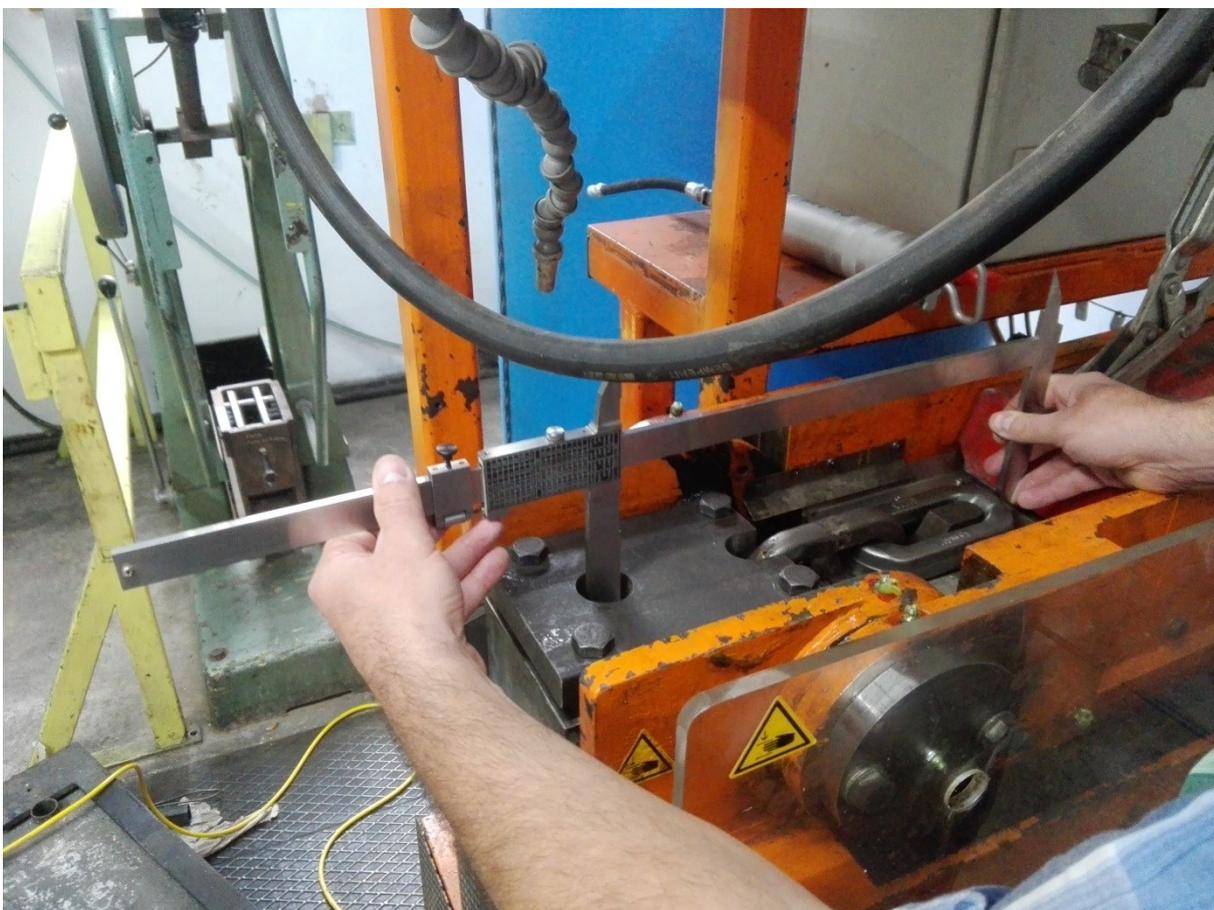


Abbildung 72: Verschleißmessung

5.2.3.2 Versuchsaufbau mit der Kettenzugprüfmaschine der Fa. Pewag

Um nicht nur den Werkstoff in einer Zugprüfmaschine zu prüfen, sondern gleich die Kettengeometrie mit, bedient man sich einer Kettenzugprüfmaschine. Das Prinzip des Zugversuchs bleibt gleich, die Prüfmaschine sieht aber anders aus und auch die Prüfkörper. Meist verwendet man eine Horizontalprüfmaschine. Abbildung 73 demonstriert die Prüfmaschine, die bei der Firma Pewag zur Verfügung steht. Da man sich keine genormten Prüfkörper von einer normalen Zugprüfmaschine bedient, sondern direkte Kettenglieder und damit Kettengeometrien, werden wesentlich höhere Kräfte benötigt um so einen Prüfkörper zu „zerreißen“. Aus diesem Grund sind diese Kettenzugprüfstände auch so gigantisch in ihrer Größe. Einzelne Kettenglieder werden einer Zugbelastung unterzogen. Es können sowohl Zugversuche bis Bruch als auch Belastungsprüfungen bis zu einer definierten Lastgrenze durchgeführt werden. Programmgesteuerter Versuchsablauf mit digitaler Messwerverfassung, Speicherung und Darstellung des Kraft-Wegverlaufs gehört zu den Aufgaben dieser Prüfanlage. Die Versuchsauswertung und Berechnung der Kennwerte wie z. B. Reißkraft, Bruchdehnung, Dehnung unter einer definierten Last erfolgt nach den entsprechenden Normen und Prüfvorschriften.



Abbildung 73: Kettenzugprüfmaschine bei der Fa. Pewag

Diese Prüfmaschine kann eine Zugkraft von bis zu 3000 KN aufbringen und wird hydraulisch durch einen Spindeltrieb betrieben. Während der rechte Einspannbock starr ist, kann man den linken Einspannbock, durch den Spindeltrieb, auf einen gewünschten Abstand einstellen.

Versuchsaufbau:

Als erstes fährt man die beiden Einspannböcke für die Kette ganz zusammen, um den Prüfkörper einhängen zu können. Die Schutzabdeckung, welche die Personen rund um das Gerät vor herumfliegenden Kettenteilen beim Versagen der Kette, während des Zugversuchs, schützen soll, ist während dieses Vorganges geöffnet (Abbildung 74).

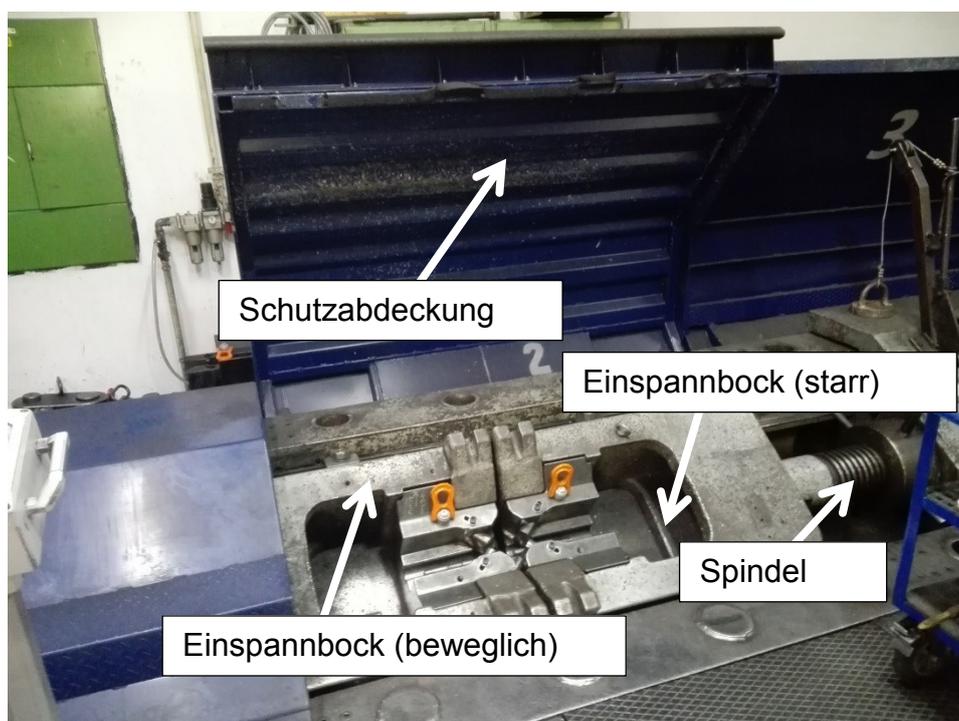


Abbildung 74: Schutzabdeckung geöffnet

Dann wird der Prüfkörper in die Einspannböcke eingehängt und auf die Startprüflänge kalibriert, um korrekte Prüfergebnisse zu erhalten (Abbildung 75). Als nächstes werden die Prüfparameter in der Software am Computer richtig eingestellt.

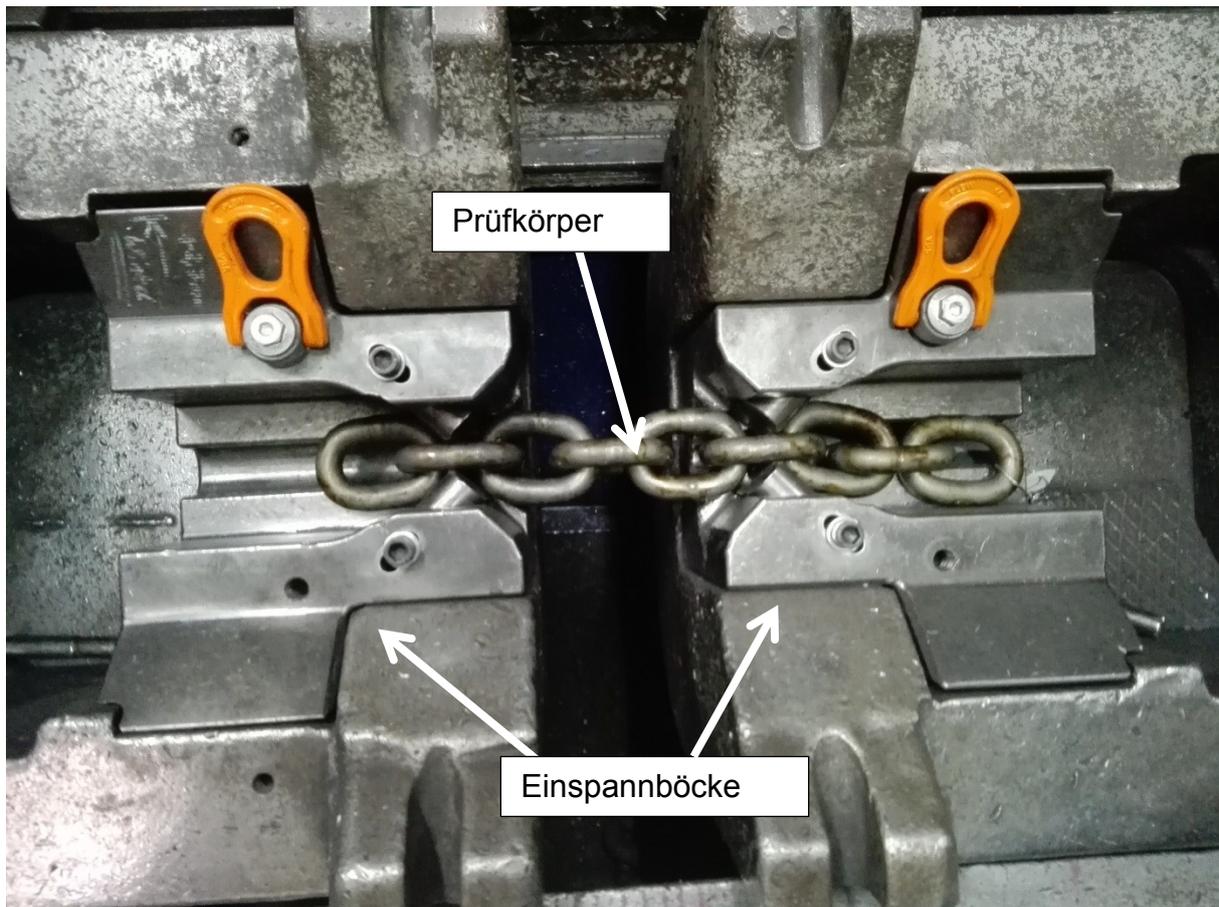


Abbildung 75: Eingehängter Prüfkörper

Ist dies alles geschehen, wird die Schutzabdeckung geschlossen und der Zugversuch gestartet (Abbildung 76).

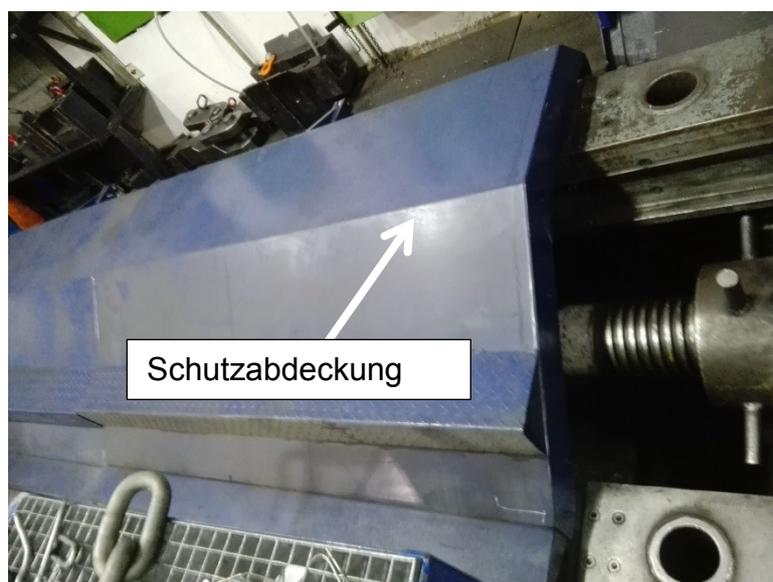


Abbildung 76: Schutzabdeckung geschlossen

Nun wird der Kraft-Weg-Verlauf aufgezeichnet, solange bis die Probe zerstört wird. Es werden auch Daten wie Zugfestigkeit oder Bruchkraft tabellarisch ausgewertet. Einerseits zeigt die Prüfmaschine an das die Probe zerstört wurde, andererseits hört man es auch anhand eines lauten Knalls. Während des „Zerreißens“ der Probe könnten Probestücke durch die hohe Energie, die in der Zugprobe gespeichert wurde, wie Geschosse herumfliegen, deswegen verwendet man auch diese zuvor erwähnte Schutzabdeckung. Abbildung 77 zeigt die Computereinrichtung der Prüfmaschine, welcher die Daten erfasst und auswertet.

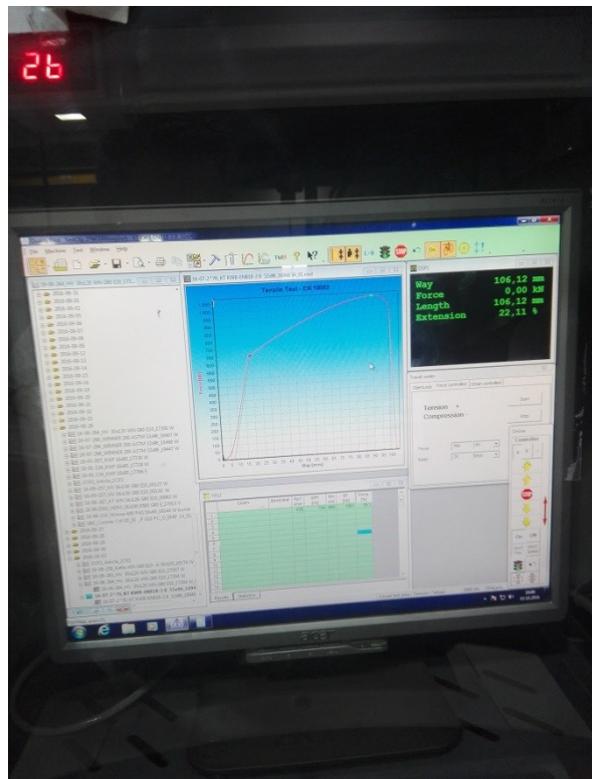


Abbildung 77: Computer der Kettenzugprüfmaschine zur Datenerfassung

Nachdem die Kette geprüft wurde und die Daten auch erfasst und gespeichert wurden, kann man die Schutzabdeckung wieder öffnen und dann die Kettenteile herausnehmen. Dadurch, dass so ein Prüfkörper wesentlich mehr Kettenglieder besitzt als für einen Versuch nötig, kann man mit einem Prüfkörper mehrere Zugversuche durchführen. Auf diese Weise kann man mehrere Schweißnahtvariationen probieren und diese gleich hintereinander prüfen.

Die Kettenglieder werden wieder, so gut es geht, zusammengesetzt und fotografiert (Abbildung 78). Die Bruchkraft muss nun höher sein als die mindestens geforderte Bruchkraft, die der Werkstoff bei dieser Geometrie haben darf.

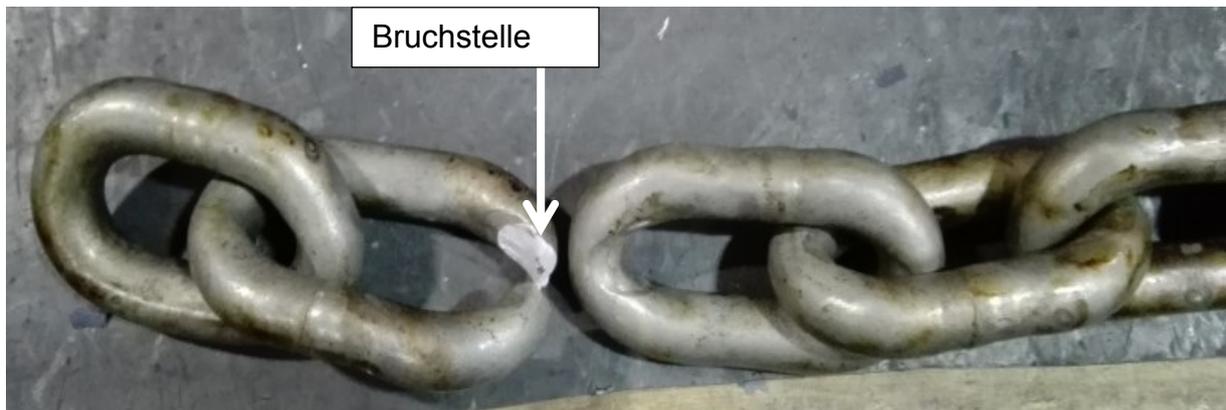


Abbildung 78: Zerörter Prüfkörper

Die Hydraulik dieser Prüfmaschine wird mittels eines Joysticks bedient (Steuereinrichtung), dieser und die Hydraulikeinrichtung sind in Abbildung 79 ersichtlich.

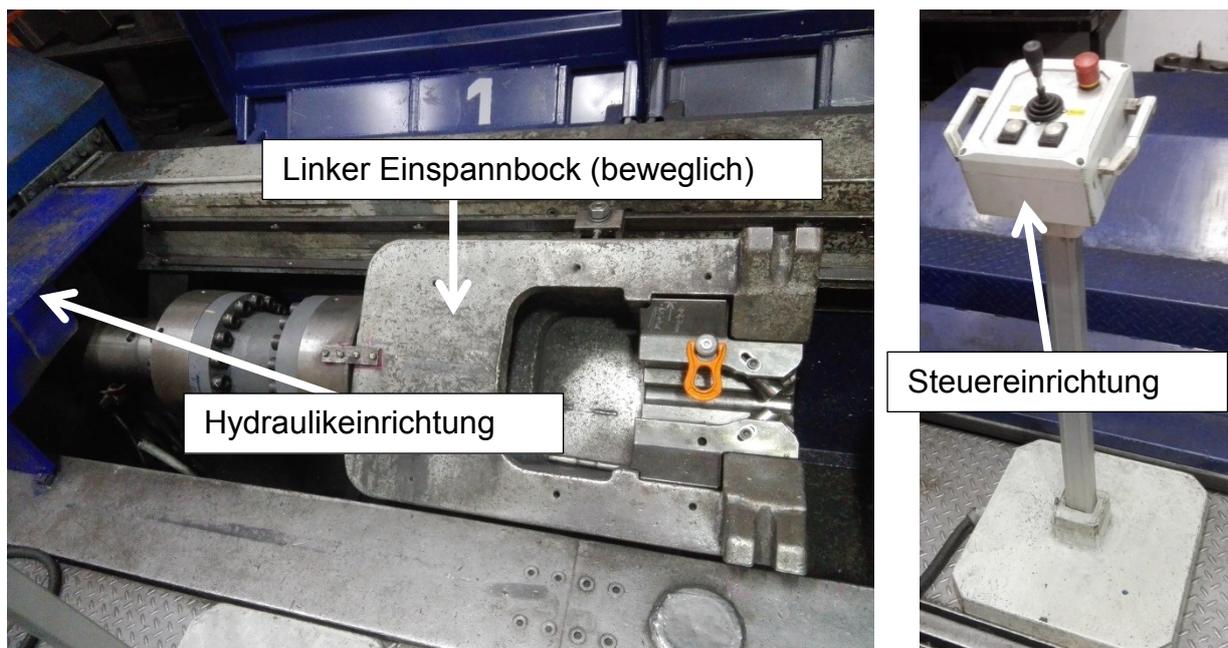


Abbildung 79: Hydraulikeinrichtung und Steuerungseinheit

5.3 Versuchsauswertung und Diskussion der Ergebnisse

Die gesammelten Daten werden hier analysiert und ausgewertet. Ziel ist es eine Gegenüberstellung zwischen verschiedenen Parametern, wie Geometrie, Werkstoffen und ähnlichen zu erhalten. Somit kann man erkennen ob diese Veränderungen einen Vorteil zum Vorhergehenden gebracht haben oder nicht.

5.3.1 Schwenktribometer

Im Kapitel 5.2.3.1 wurde schon davon gesprochen, dass der maximale Winkel zwischen den geprüften Kettengliedern ungefähr 21° beträgt. Wenn man sich bei Becherwerken die maximale Abwinkelung der Kettenglieder zueinander ansieht, liegt diese je nach Zähnezahl und Durchmesser des Zahnrades im Bereich von 20° bis 26° . Daher auch diese 21° Abwinkelung, dieser Wert ist in der Realität gängig. Unser Verschleißversuch ist mit einem Kettenrad, eines Becherwerks, mit einer Zähnezahl von 18 Stück vergleichbar, der Teilungskreisdurchmesser beträgt ungefähr einen Meter. Abbildung 80 zeigt wie diese Abwinkelung α zu verstehen ist. α ist bei diesen Versuchen also im Intervall von 0° bis 21° . Es wird über einen Exzenter eingestellt.

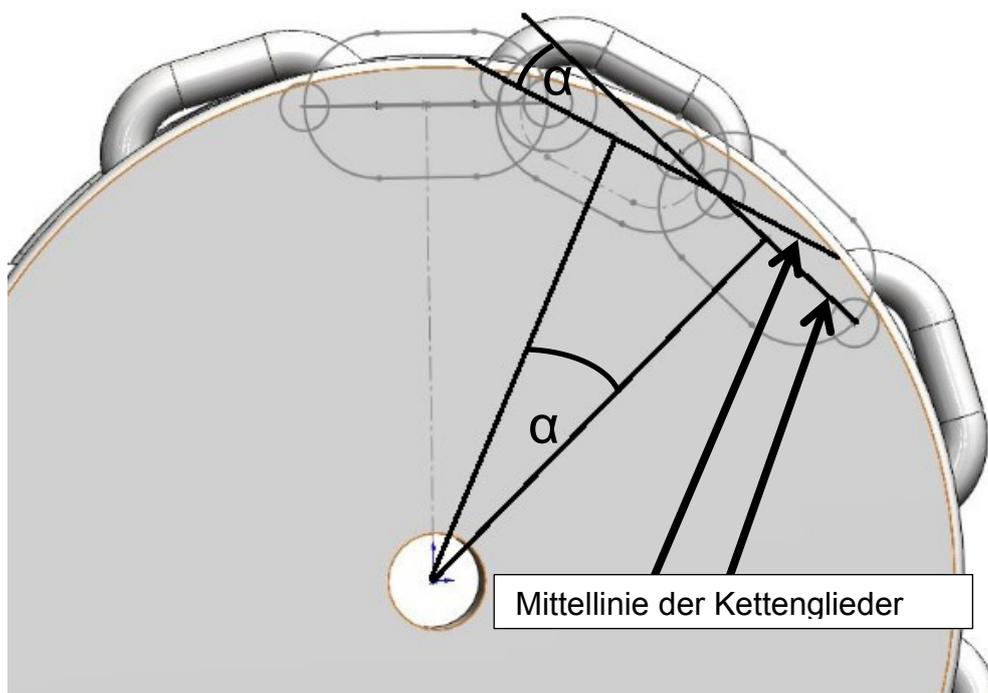


Abbildung 80: Abwinkelung α



Bei allen Verschleißprüfungen wurden die Hauptparameter immer gleich eingestellt. Der Anpressdruck, der auf beide Kettenglieder während des Versuchs wirkt, wurde immer auf 60KN (150bar) eingestellt. Natürlich kann man diesen Wert immer nur als Mittelwert betrachten, in der Realität schwanken die Werte über oder unter diesem Wert, manchmal stärker und manchmal schwächer. Bei der Anzahl der Zyklen geht man auf einen messbaren Vergleichswert, diesen Wert erreicht jede Verschleißprobe nach einer gewissen Versuchszeit bei den eingestellten Prüfbedingungen. Dadurch erhält man eine Tendenz, in welcher sich die einzelnen Werkstoffe und Geometrien mit der Zeit hin entwickeln werden, rein unter Betrachtung des Verschleißes. Die Geschwindigkeit auf diesem Prüfstand wurde mit 30% seiner Höchstgeschwindigkeit angenommen. Das entspricht einem Zyklus in gut 4,8 Sekunden, also 750 Zyklen in einer Stunde und das sind 18000 mögliche Zyklen pro Tag. Mögliche Zyklen deswegen, weil es vorkommen kann das der Prüfstand gewartet werden muss, diese Zeit muss man wieder rückrechnen um auf die richtigen Zyklen des Tages zu kommen, aber unter idealen Bedingungen erreicht man am Tag diese 18000 Zyklen. Der Prüfstand ist auch täglich zu schmieren, dafür muss die Maschine aber nicht gestoppt werden. Die Winkelgeschwindigkeit beträgt rund 0,2 Umdrehungen pro Sekunde, das ist bei dieser Anlage eine Hubgeschwindigkeit von ungefähr 0,5 km pro Stunde. Eine Versuchsprobe wurde mit einer Hubgeschwindigkeit von 14% durchgeführt, um den Einfluss der Temperatur zu erhalten (geringere Temperatur kann geringeren Verschleiß bedeuten). Diese Probe wurde aus Zeitgründen eingespannt, da man auf die eigentliche Verschleißprobe warten musste, bis diese die richtige Oberflächenbehandlung erhalten hat. Aber dieser Versuch könnte von Vorteil sein, weil man so überprüfen kann, ob gleiche Geometrie, gleicher Werkstoff und gleiche Oberflächenbehandlung, bei unterschiedlicher Hubgeschwindigkeit, eventuell, einen nicht zu vernachlässigenden Unterschied beim Verschleiß bedeuten kann. Im Folgenden sind alle Kettenglieder mit den Namen wie U1TB, U1TE, U1TA und U1TC Abwandlungen der „Hero“-Kette der Firma Pewag. Diese einzelnen Kettenglieder unterscheiden sich nur geringfügig in ihrer Geometrie.

5.3.1.1 Temperaturmessung

Zu Beginn jedes Verschleißversuches wurden die Prüfkörper einigen Temperaturmessungen bei verschiedenen Hubgeschwindigkeiten ($v=50\%$, $v=35\%$ und $v=30\%$) des Prüfstandes unterzogen, um zu ermitteln wie sich ihre Geometrie und möglicherweise auch der Werkstoff auf die Temperaturentwicklung auswirken. Eine Hubgeschwindigkeit von 30% entspricht 4,8 Sekunden pro Zyklus, eine Hubgeschwindigkeit von 35% entspricht 4,25 Sekunden pro Zyklus und eine Hubgeschwindigkeit von 50% entspricht 3,3 Sekunden pro Zyklus. Eine Probe wurde aus Verzögerungsgründen der eigentlich geplanten Verschleißprobe bei einer Hubgeschwindigkeit von $v=14\%$ geprüft, das entspricht einer Zeit von 7,5 Sekunden pro Zyklus, die Maximaltemperatur dieser betrug 90°C . Das Ganze ging bei allen Versuchen bis 600 Zyklen und 60 KN (150bar) Anpresskraft. Diese Maximaltemperatur ist deutlich geringer, als der gleiche Prüfkörper bei einer Hubgeschwindigkeit $v=30\%$ (Maximaltemperatur ist 120°C). Hierbei kann man wieder deutlich erkennen, wie die Hubgeschwindigkeit, Einfluss auf die Temperatur hat. Aufgrund dieser Versuche kann man allgemein sagen, dass die Temperatur in den Berührungspunkten der Kettenglieder umso geringer ist, je kleiner die Umdrehungsgeschwindigkeit der Becherwerkszahnräder bei Becherwerken eingestellt wird. Gründe für die Temperaturentwicklungen sind die Geometrie, der Werkstoff, die Umgebung, sowie die Belastungsart.

- U1TA-U1TB-Kette (Hero-Kette)

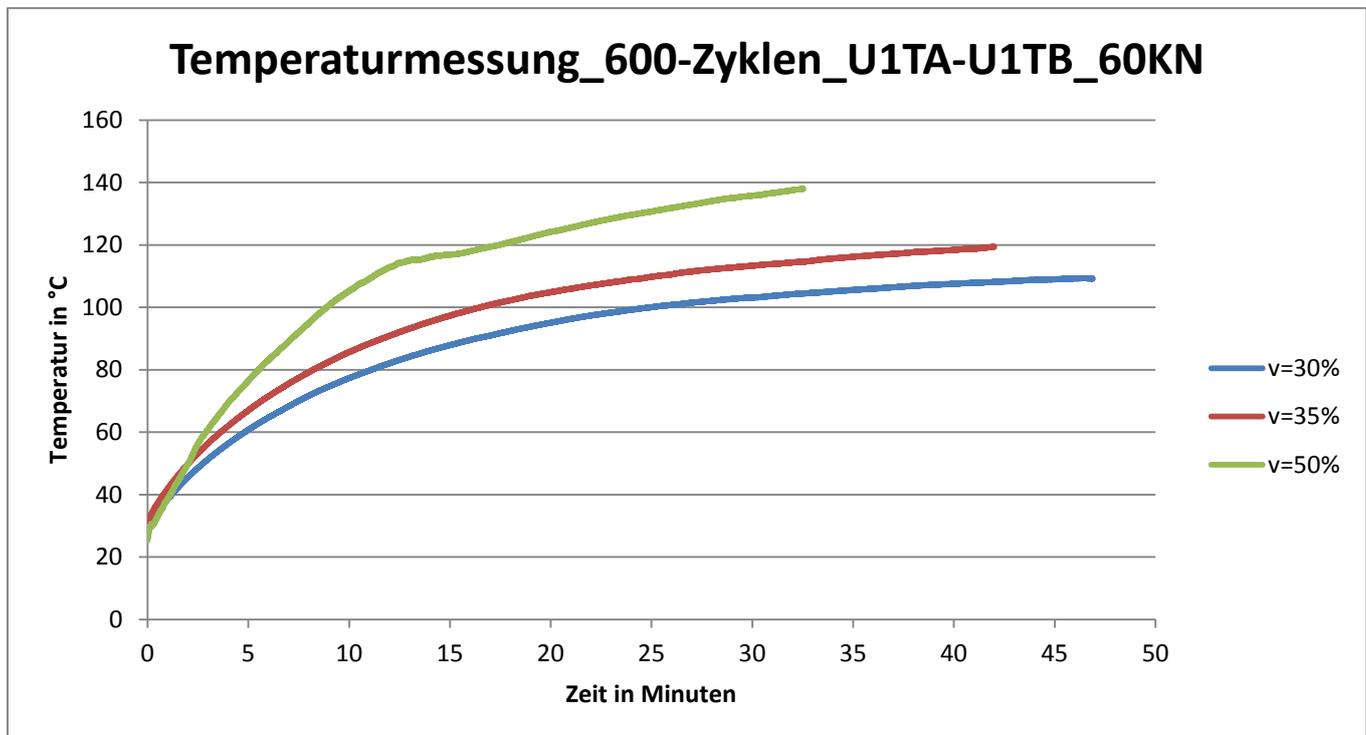


Abbildung 81: Temperaturmessung der U1TA-U1TB Geometrie

Wie in Abbildung 81 ersichtlich kann man sagen, dass die Temperatur umso schneller ansteigt, je höher die Hubgeschwindigkeit ist. Der Grund dafür ist, dass bei höheren Geschwindigkeiten die Wärme nicht mehr so schnell abgeführt werden kann und dadurch die Hitzestauung dazu führt, dass die Temperatur in den Kettengliedern der beiden Reibpartner ansteigt. Ab einer gewissen Temperatur bleibt sie dann konstant. Die Höhe der maximal erreichbaren Temperatur, bzw. die Geschwindigkeit, mit der die Temperatur ansteigt, hängt sowohl von der Geometrie ab, also auch vom Werkstoff und der Belastungsart.



Abbildung 82: U1TA-U1TB

- U1TE-U1TC-Kette (Hero-Kette)

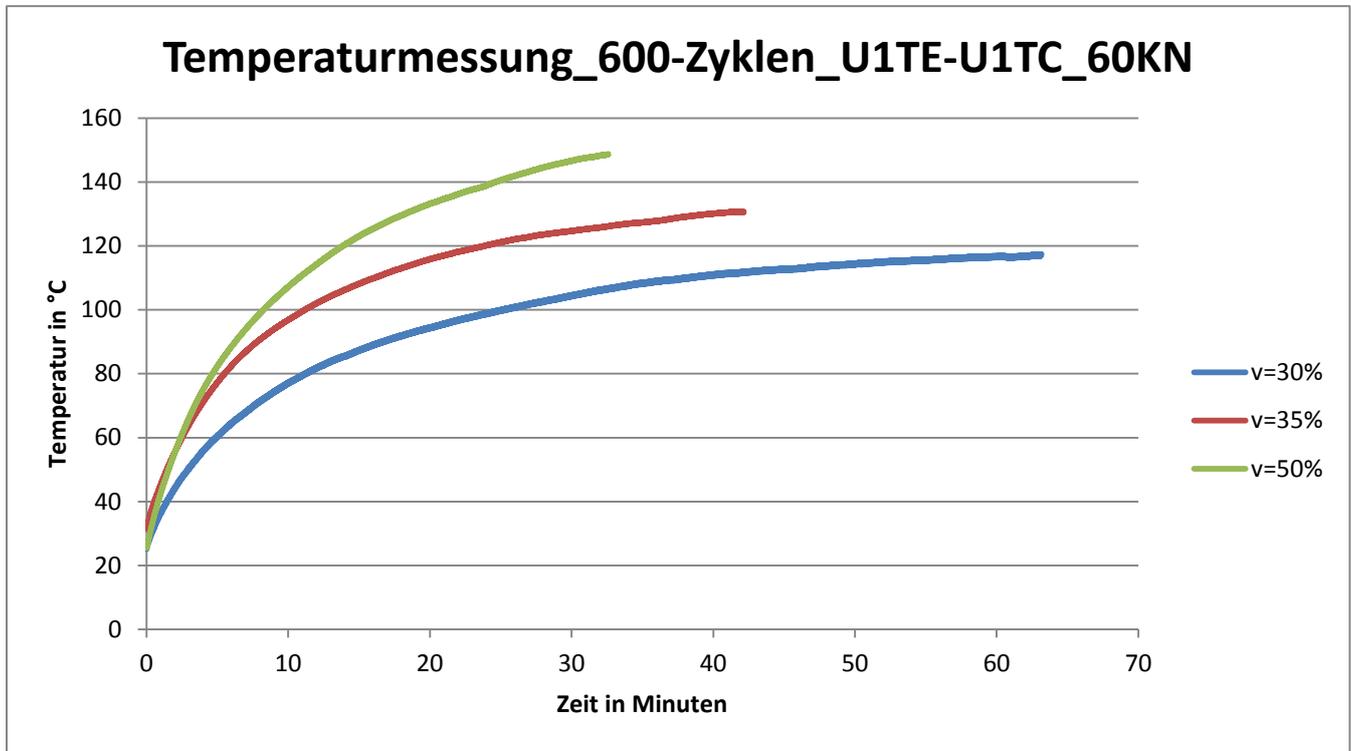


Abbildung 83: Temperaturmessung der U1TE-U1TC Geometrie

In der Abbildung 83 sieht man, dass sich auch hier abzeichnet, was man schon in Abbildung 81 sehen konnte. Auch hier ist der Temperaturanstieg höher, je höher die Hubgeschwindigkeit ausfällt. Während die Temperaturanstiege zwischen diesen beiden Geometrien relativ gleich sind, ist die Maximaltemperatur bei der neuen Geometrie um circa 10° höher. Das kann sein, weil bei dieser Geometrie an den Berührungspunkten der Glieder etwas verändert wurde. Dadurch haben die Glieder weniger Spielraum (= mehr Reibung) und deswegen steigt hier die Temperatur auch stärker an. Abbildung 84 zeigt die neue Geometrie.



Abbildung 84: U1TE-U1TC

- Rundstahlkette (Referenzkette)

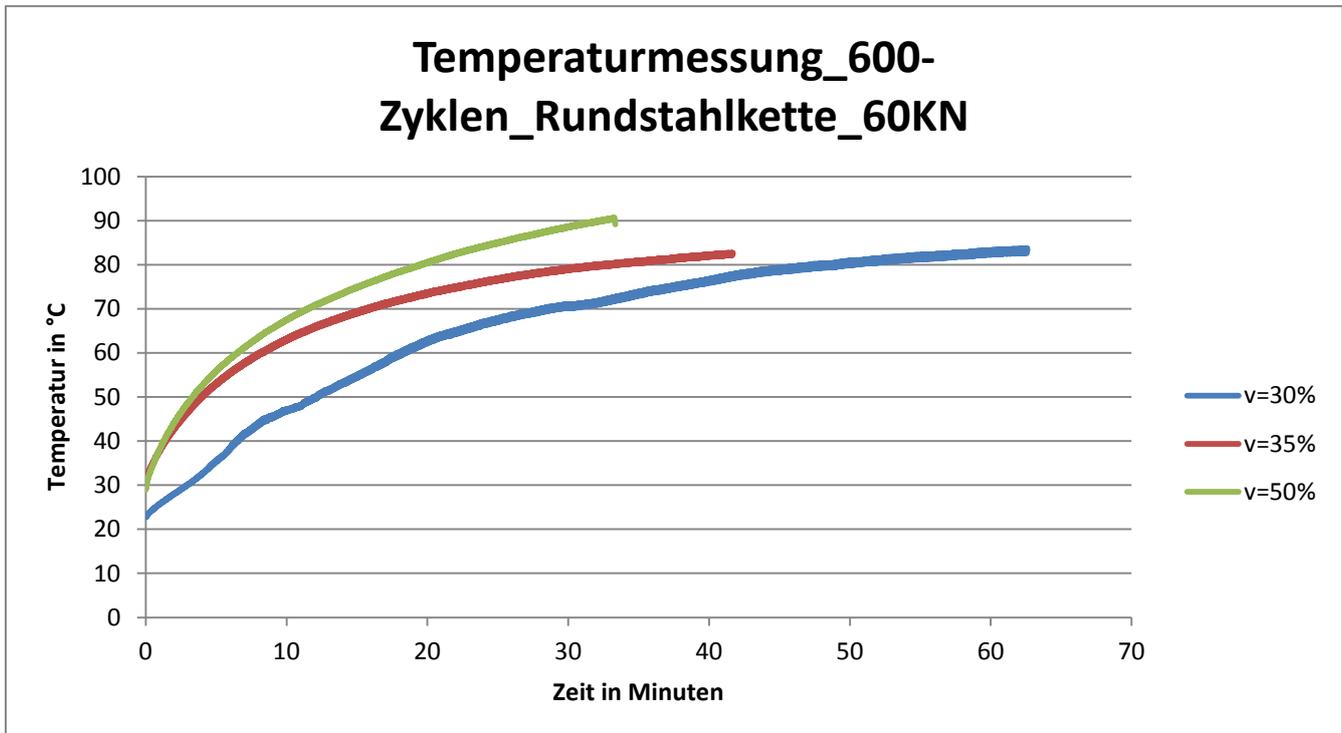


Abbildung 85: Temperaturmessung Rundstahlkette

Bei der Temperaturmessung der Rundstahlkette (Abbildung 85) kann man erkennen, dass die Maximaltemperaturen deutlich geringer ausfallen als bei den Schmiedegeometrien (Hero-Ketten) zuvor. Das kann darauf zurückzuführen sein, dass diese Geometrie wesentlich homogener ist und dadurch die Wärme sehr viel besser abgeführt werden kann. Auch der Schmiedegrat ist nicht vorhanden, was sich günstig auf die Wärmeentwicklung auswirken wird. Einzig und allein die Flächenpressung ist höher, trotzdem ist die Temperatur durch die hohe Wärmeabfuhr wesentlich geringer. So eine Rundstahlkette wird in Abbildung 86 demonstriert.



Abbildung 86: Rundstahlkette aus 18CrNiMo7-6

- **Temperaturmessungen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten**

Diese Übersicht ist wichtig, weil die gesamte Verschleißprüfung bei einer Hubgeschwindigkeit (bis auf eine) von 30% durchgeführt wurde. Die anderen Hubgeschwindigkeiten dienen der Klärung, wie sich die unterschiedlichen Hubgeschwindigkeiten auf die Temperatur auswirken.

Zu der Probe U1TE-U1TC mit der Hubgeschwindigkeit von 14% gibt es keine Temperaturoaufzeichnungen. Dafür hat man bei dieser Probe mit einer Thermoaufnahme die Temperaturdaten, in allen wichtigen Bereichen der Kette, aufgezeichnet. Abbildung 87 zeigt diese Aufnahme.

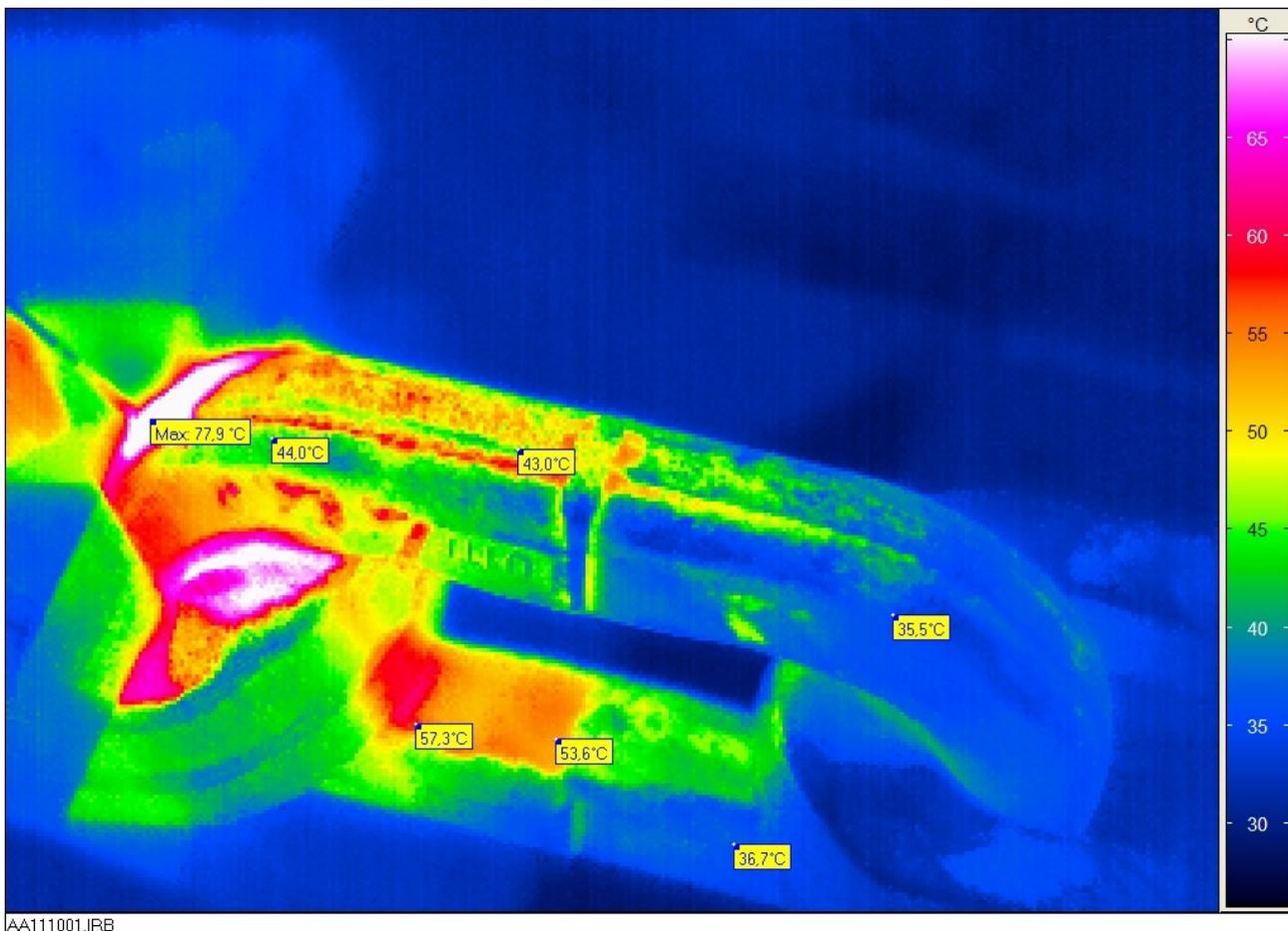


Abbildung 87: Thermobild der U1TE-Geometrie bei 14% Geschwindigkeit

Abbildung 88 zeigt die Übersicht der Temperaturmessungen, bei den Hubgeschwindigkeiten 50% und 30%, der Rundstahlkette und den neuen Geometrien. Zwischen Rundstahlkette und Schmiedegeometrien unterscheidet sich immer die Geometrie, teilweise auch der Werkstoff.

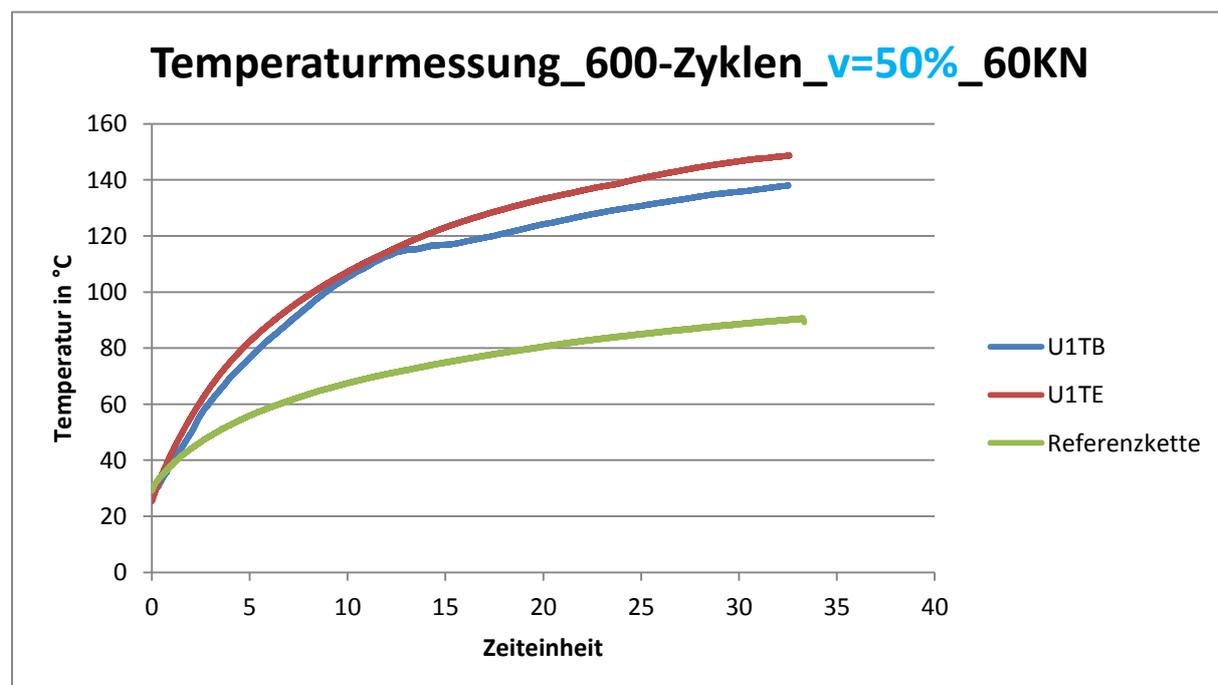
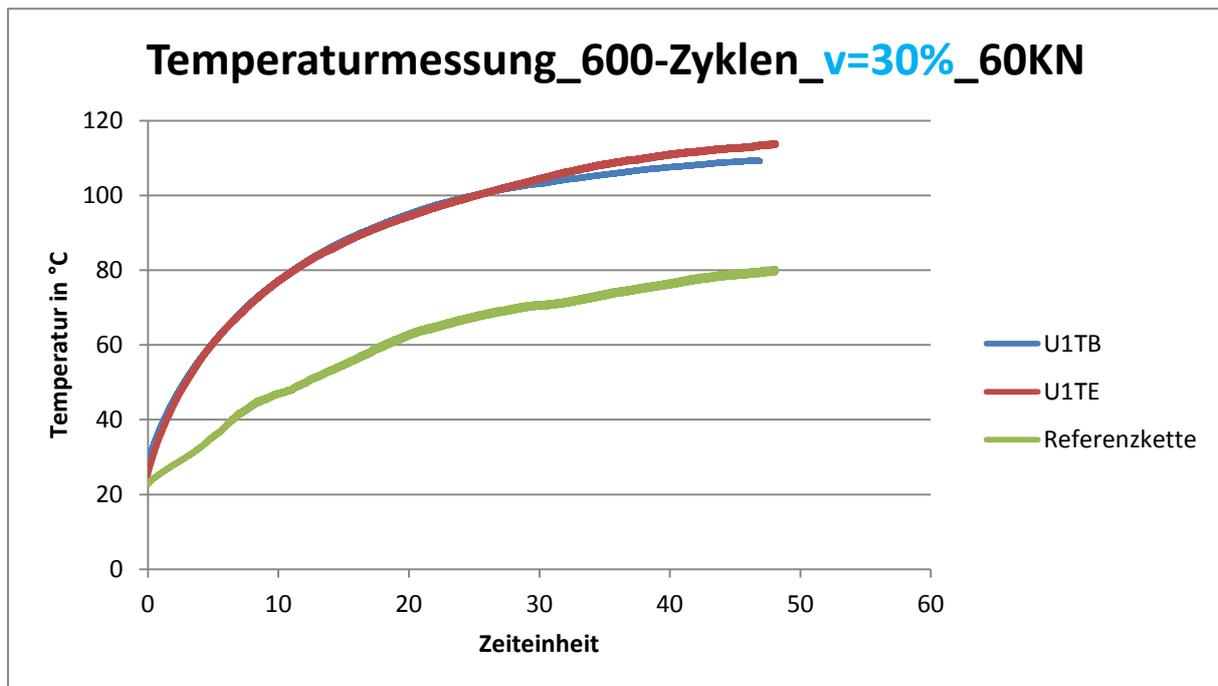


Abbildung 88: Übersicht der Temperaturmessungen bei verschiedenen Hubgeschwindigkeiten

All diese verschiedenen Temperaturmessungen zeigen, dass mit höherer Hubgeschwindigkeit, auch die Maximaltemperatur steigt. In allen Fällen wurde die U1TE-U1TC-Geometrie am meisten erwärmt, die U1TB-U1TA-Geometrie wurde immer am zweitstärksten erwärmt und die Rundstahlkette erwärmte sich in allen Versuchen am geringsten. Wobei erkennbar ist, dass bei der Prüfgeschwindigkeit von 30%, die U1TE-U1TC-Geometrie und U1TB-U1TA-Geometrie sehr nahe beieinander liegen, nur zum Ende des Versuchs unterscheiden sich die beiden Steigungen ein wenig.

Bei all diesen Temperaturen werden noch keine wesentliche Prozesse oder Reaktionen aktiviert, die durch thermische Einwirkung zu einem enormen Verschleißanstieg führen würden. Auch die Steigungen der Temperaturgradienten sind relativ ident, auch dadurch kann man die Temperatur als Verschleißparameter eher in den Hintergrund stellen. Dennoch zeigen diese Versuche, dass je schneller man mit der Kette verfährt, sich die Berührflächen stärker erwärmen. Prinzipiell besteht also die Möglichkeit, dass man in Temperaturbereiche kommt, wo Kriecheffekte, Diffusionsvorgänge und andere metallurgische Phänomene auftreten können. Ab diesem Zeitpunkt hätte die Temperatur, hervorgerufen durch die Maschinengeschwindigkeit, Umgebungsbedingung, Anpresskraft (Flächenpressung) und den Werkstoff der Kette, einen hohen Einfluss auf den Verschleiß. Umgebungsbedingungen können auch zu einem Ansteigen der Kette führen. Ketten werden oft Untertage eingesetzt, hier hat man es oft mit Staub und ähnlichen zu tun. Staubpartikel können durch ihre gegenseitige Reibung aneinander, die Luft und damit die Temperatur stark erwärmen, was bedeutet man hat nicht mehr nur 24°C, sondern wesentlich höhere Temperaturen in der Umgebung.

Trotzdem muss man auch bei diesen Versuchen, einen wenn auch nur kleinen Teil des Verschleißes, der Temperatur zuschreiben. Durch die erhöhte Temperatur, hervorgerufen durch die Reibung der Kettenglieder wegen der Anpresskraft, wird der Werkstoff etwas angreifbarer für Verschleiß, als wenn Raumtemperatur herrschen würde. Dennoch ist der Anteil sehr gering.

Das die Schmiedegeometrien (Hero-Ketten) höhere Temperaturen erzeugen kann mehrere Gründe haben. Die Geometrien sind wesentlich komplexer, als die einer Rundstahlkette. In den Berührungspunkten sind die Glieder nicht so frei beweglich, wie die der Rundstahlkette. Diese neueren Geometrien sollen in erster Linie die Flächenpressung senken und damit für weniger Verschleiß und auch einen gleichmäßigeren Verschleiß sorgen. Die Wärme dieser Glieder kann nicht so leicht abgeführt werden, aufgrund der ungleichmäßigen Geometrie, dadurch steigt die Temperatur mehr und auch schneller an (Hitzestauung), als die der Rundstahlkette. Auch der Werkstoff kann für unterschiedliche Hitzeentwicklungen verantwortlich sein. Es sind zwar beides Vergütungsstähle, aber dennoch unterschiedliche Legierungen, was vor allem den Kohlenstoff betrifft. Möglicherweise hat der Kohlenstoff, Einfluss auf die höhere Temperaturzunahme. Die Schmiedegeometrien besitzen fast doppelt so viel Kohlenstoff, als die Rundstahlkette. Andere Einflüsse, als Werkstoff und Geometrie, sind nicht möglich. Die Oberflächenhärten befinden sich alle in den Toleranzen, auch hier kann deswegen kein Unterschied gefunden werden.

Die Temperaturgradienten bei allen Proben, obwohl sich die Hubgeschwindigkeiten verändern, zeigen denselben Anstieg. Das bedeutet, auch wenn sich die Maximaltemperaturen verändern, bleibt der zeitliche Temperaturanstieg konstant. Diese Erkenntnis ist wichtig, weil man dadurch sagen kann das die Kettenglieder bei den jeweiligen Hubgeschwindigkeiten sich sehr ähnlich verhalten müssen, lediglich der Verschleiß müsste bei einer höheren Hubgeschwindigkeit größer ausfallen, als bei einer niedrigeren Hubgeschwindigkeit, Grund dafür ist die höhere Erhitzung des Kettengliedes.

5.3.1.2 Verschleißprüfung im Kurzzeitbereich

In diesem Kapitel werden nun alle Verschleißdaten der einzelnen Proben gegenübergestellt. Es werden alle Proben einzeln beschrieben und letztendlich diese in mehreren Grafiken dargestellt. Die Proben wurden circa zwei Wochen lang den Verschleißparametern ausgesetzt, um sie miteinander vergleichen zu können. Je nachdem wie Geometrie, Härtingsverfahren und Werkstoff gewählt wird, kann es zu mehr oder weniger Verschleiß kommen. Ein weiterer Grund für Verschleiß kann der sogenannte Korngleitverschleiß sein. Es ist der Materialabtrag aufgrund von Abrasivteilchen, während der Relativbewegung der Kettenglieder zueinander. Diese Abrasivteilchen müssen nicht nur aus der Umgebung zwischen die Kettenglieder geraten, sie können auch aus dem eigenen Verschleißmaterial der Kettenglieder heraus entstehen. Wenn man die Ketten nach dem Verschleißversuch untersucht, erkennt man sehr viele feine Partikel an den Berührungspunkten der Kettenglieder, das sind die aufgrund des Verschleißes abgeriebenen Materialspuren der Kette. Auch diese können in der falschen Umgebung zu einem Problem werden. Aus der Literatur weiß man, dass die Verschleißrate umso höher ist, je größer und Härter die Abrasivpartikel sind. Die Kornform hat nur einen Einfluss auf den Verschleiß, wenn das Teilchen nicht durch die Flächenpressung zerkleinert wird. Scharfkantige Abrasivteilchen verursachen einen wesentlich höheren Schaden, als abgerundete. Der Korngleitverschleiß, ist eine Form des Furchungverschleißes.

Abbildung 89 zeigt die vollendete Verschleißprüfung aller Prüfkörper, aufgetragen ist der Verschleiß über der Zyklenzahl.

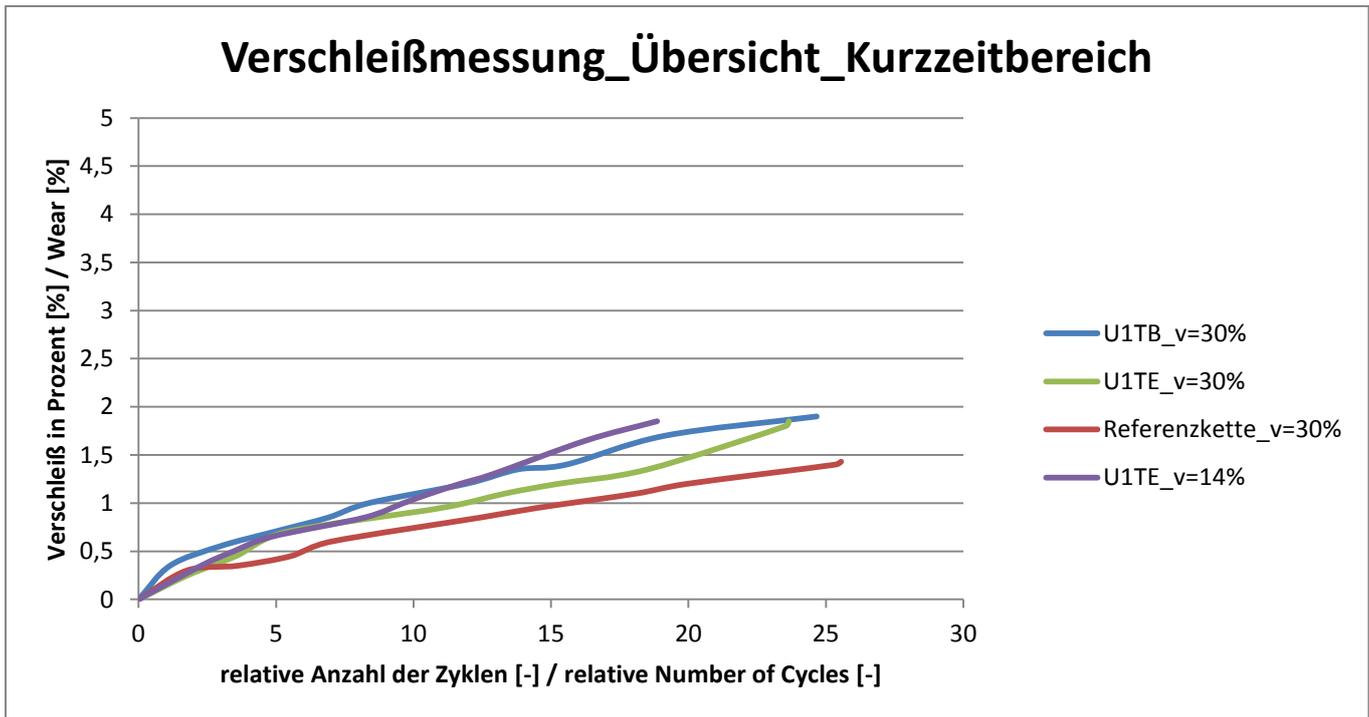


Abbildung 89: Verschleißmessung

Man kann sehen, dass die U1TB und die U1TE (Schmiedegeometrien) aus dem 30CrNiMo8 hergestellten Werkstoff einen gleichmäßigen Verschleiß aufweisen. Nachdem der Einlaufverschleiß überwunden wurde, flacht die Verschleißkurve bei Beiden ab. Dieser Einlaufverschleiß ist auf den Schmiedegrat zum einen und auf die anfängliche Werkstoffoberfläche zum anderen zurückzuführen. Sobald der Schmiedegrat verschließen ist, wird die Oberfläche homogener, da keine Überhöhung des Schmiedegratmaterials mehr vorhanden ist. Das ist der Hauptgrund dafür, dass am Anfang der Verschleiß schneller vorangeht. Die Härteverläufe sind bei beiden Schmiedegeometrien (Hero-Ketten) ident. Bei Schmiedegeometrien kommt man um diesen Schmiedegrat nicht herum, weshalb man schauen soll das dieser so gering wie möglich ausfällt. Auch wenn bei dieser Versuchsreihe am Ende die neue Geometrie mit der alten Geometrie gleich auf ist, kann man dennoch sagen das die neue Geometrie besser abschneidet. Ein Grund dafür das sie am Ende gleich auf sind, könnte schon die Tatsache sein, dass der Prüfstand einige Stunden fehlerhaft gelaufen ist, nämlich mit bis zu 165 bar. Das muss man als Fehleranteil zugunsten der neuen Geometrie anrechnen, da der Materialabtrag angestiegen ist.

Nach dieser Versuchsreihe ist der Schmiedegrat bei der neuen Geometrie (U1TE-U1TC) gänzlich verschwunden gewesen, während er bei der alten Geometrie (U1TA-U1TB) teilweise noch vorhanden war. Daraus ist zu schließen, dass die neue Geometrie (U1TC-U1TE) schneller homogen wird und so der Verschleiß geringer ausfällt. An der neuen Geometrie wurde nur an den Berührflächen der Kettenglieder eine Geometrieänderung vorgenommen. Mit freiem Auge sieht man diese nur, wenn man zuvor darüber informiert wurde. Am restlichen Verlauf der Versuchsreihe kann man erkennen, dass die alte Geometrie größtenteils einen höheren Verschleiß aufweist, als die neue Geometrie. Nach ungefähr 5% Verschleiß wird sich dann zeigen welcher Prüfkörper sich am besten bewährt. Ab diesem Zeitpunkt wird die Oberflächenhärte in den Berührflächen der Kettenglieder schon stark vermindert sein, da bei diesem Verschleiß die Einsatzhärteschicht schon sehr beeinträchtigt ist. Aus Zeitgründen ist man in dieser Arbeit aber darauf angewiesen, einen verkürzten Prüfzeitraum zu wählen und diese Daten als Trend zu interpretieren. Wenn man 5% Verschleiß bei einem Versuch dieser Parametereinstellungen erreichen will, muss man circa vier Wochen einen Prüfkörper im Schwenktribometer eingespannt lassen.

Es ist schwierig zu sagen, ob man durch höhere Hubgeschwindigkeiten und die daraus erhöhte Temperatur der Kettenglieder, tatsächlich einen deutlich höheren Verschleiß erreichen wird. Sonst könnte man ja, um schnellere Versuchsergebnisse zu erhalten, die Hubgeschwindigkeit auf Maximum stellen und man hätte dieselbe Zyklenzahl in einer viel geringeren Zeit. Dafür besteht die Gefahr, dass man Realitätsfern wird und so etwas ist nicht zweckdienlich. Natürlich wird eine höhere Hubgeschwindigkeit einen höheren Verschleiß bedeuten, aber ob dieser so viel höher ist, im Vergleich dazu, dass die Versuchsdaten von dem Einsatz in der Praxis stark abweichen können, ist fraglich, da der Verschleiß von anderen Parametern wesentlich mehr abhängt.

Die Temperaturen, die durch die Reibung entstehen, werden mit der Zeit konstant, was bedeutet sie steigen nicht weiter an. Die höchste Temperatur, welche erreicht wurde, war um die 150 °C, bei dieser Temperatur kann es aber weder zu einflussreichem Kriechen kommen, noch zu metallurgischen Phänomenen wie zum Beispiel Diffusionsvorgänge. Der Verschleiß wird also nicht wesentlich durch die Reibungstemperatur, in dieser Größenordnung, ansteigen. Man kann sagen, dass die U1TE-U1TC und U1TB-U1TA Geometrien einen schön gleichmäßigen Verschleiß aufweisen.

Abbildung 90 zeigt die verschleißene Probe der U1TB Geometrie und Abbildung 91 zeigt verschleißene Probe der U1TE Geometrie.



Abbildung 90: Fertige Verschleißprüfung der alten Geometrie

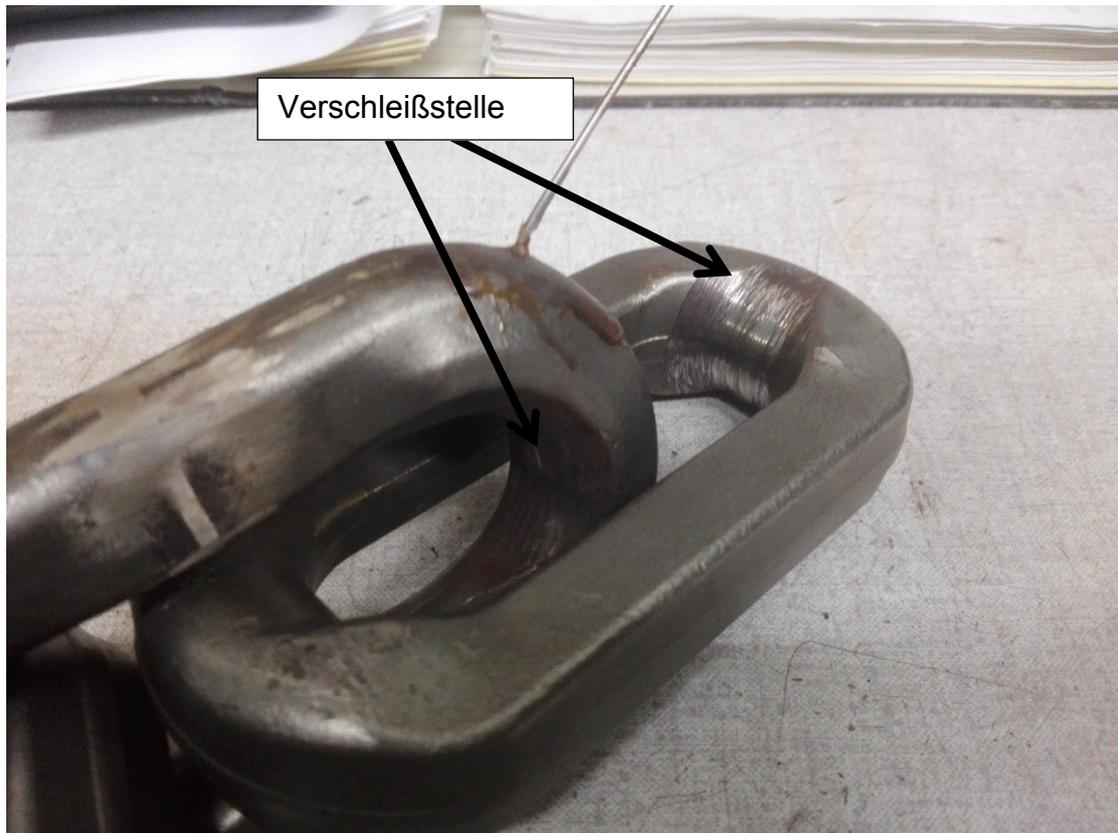


Abbildung 91: Verschleißener Prüfkörper der neuen Geometrie

Die Rundstahlkette (Abbildung 92) hat am Anfang weniger Verschleiß als die Schmiedegeometrien des 30CrNiMo8. Grund dafür ist die homogene Form dieser Kette, sie besitzt zum Beispiel keine komplexe Geometrie und auch keinen Schmiedegrat. Bei den Temperaturmessungen hat man schon gesehen, dass die Maximaltemperatur deutlich geringer ist, als bei den Schmiedegeometrien. Auch hier ist die Reibtemperatur, denen die Kettenglieder ausgesetzt sind, kein primärer Verschleißparameter. Die Temperatur beläuft sich auf unter 100°C, hier wird der Verschleiß durch Dinge wie hohe Flächenpressung und Lagewechsel der Kettenglieder zueinander vorangetrieben und nicht durch die Temperatur. Die Wärme wird besser abgeführt und dadurch ist die Temperatur in den Berührflächen geringer.

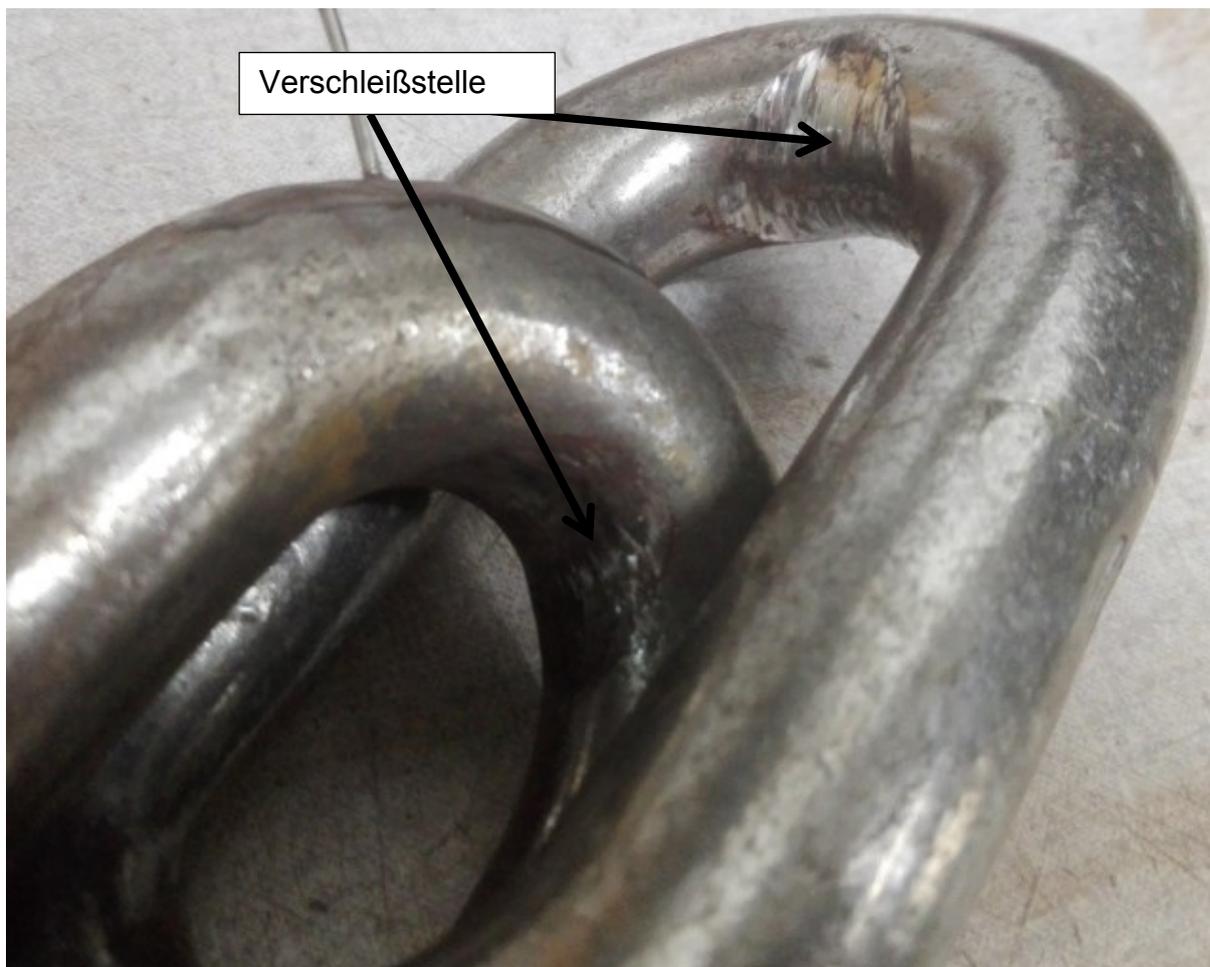


Abbildung 92: Verschleißprobe der Rundstahlkette



Sobald der Schmiedegrat bei den Schmiedegeometrien weg ist, wird der Verschleiß homogener und da die Flächenpressung geringer ausfällt, ist auch mit einer Abnahme der Steigung der Verschleißkurve zu rechnen. Da bei der Rundstahlkette die Flächenpressung größer ist, wird hier der Verschleiß mit der Zeit schneller steigen, nämlich ab dem Zeitpunkt, wo die Einsatzhärteschicht in den Kettengliedern gänzlich verschwunden ist. Der Härteabfall ist beträchtlich.

Ein weiterer Nachteil der Rundstahlkette ist die Tatsache, dass der Werkstoff ein 18CrNiMo7-6 ist. Dieser Werkstoff besitzt weniger Kohlenstoff als der 30CrNiMo8, dadurch ist die Härte geringer und spätestens wenn die Einsatzhärteschicht in den Berührungspunkten der Kettenglieder abgenutzt ist, kommt es zu einem sicheren Anstieg des Verschleißes gegenüber den beiden anderen Geometrien (Höherer Kohlenstoff = bessere Verschleißbeständigkeit).

Ein wesentlicher Vorteil der Rundstahlkette ist jener, dass die Einsatzhärte tiefe bei ihr größer ist, als die der neuen Schmiedegeometrien, was bedeutet das die Rundstahlkette an der Oberfläche eine wesentlich höhere Härte besitzt, als die Hero-Ketten. Dadurch wird die Rundstahlkette bis zu einem gewissen Punkt eine gute Performance liefern, ab dann wird aber auch bei ihr die Verschleißkurve deutlich ansteigen, da ihre Grundhärte nicht sehr hoch ist und die Einsatzhärteschicht, in den Berührungspunkten der Kette, gänzlich abgetragen ist. Durch die veränderte Geometrie soll versucht werden, wie sich die Schmiedegeometrien schlagen, wenn sie eine geringere Einsatzhärte tiefe besitzen. Alle Prüfkörper haben Einsatzhärte tiefen, welche sich im Toleranzbereich befinden (10% der Nenndicke ist anzustrebender Wert für Einsatzhärteschicht). Dafür ist der Kohlenstoffgehalt höher, was für eine höhere Grundhärte sorgt. Wenn am Ende die Rundstahlkette schlechter wäre, würde das bedeuten, dass die neue Geometrie die Reibkräfte sehr gut ableitet und man für die gleiche Performance eine geringere Einsatzhärte tiefe benötigen würde. Die Vergütungsstähle haben nur im einsatzgehärteten Bereich beste Verschleißbeständigkeiten, man muss also alles daran setzen, dass diese Härteschichten, egal welches Härteverfahren gewählt wird, so lange wie möglich in den Berührungspunkten der Kettenglieder bestehen bleiben.

Dort ist der Verschleiß, aufgrund der Belastungshöhe (Flächenpressung), Umgebungsbedingung, Belastungsart und Temperatur am höchsten. Entgegenwirken kann man dem Verschleiß mit dem Werkstoff (Kohlenstoffgehalt ergibt Grundhärte), der Oberflächenbehandlung und der Geometrie.

Weil man auf die Probe 18CrNiMo7-6 aus der neuen Geometrie warten musste, hat man stattdessen nochmal einen 30CrNiMo8 aus der neuen Geometrie eingespannt, jedoch nicht bei einer Hubgeschwindigkeit von 30%, sondern bei einer Geschwindigkeit von 14%. Man erkennt bei dieser Probe erstaunlicherweise, dass obwohl die Hubgeschwindigkeit noch einmal stark vermindert wurde (Maximaltemperatur 90°C), sich der Verschleiß nicht reduziert, sondern im Vergleich zu der Hubgeschwindigkeit von 30% deutlich ansteigt. Der Einlaufverschleiß ist bei allen Proben ähnlich, doch man erkennt, dass die Kurve immer wieder abflacht und dann wieder deutlich ansteigt. Die Steigung der Kurve ist im Mittel am größten, weshalb der Verschleiß am höchsten ausfällt. Man hätte eher erwartet, dass bei einer geringeren Geschwindigkeit, auch der Verschleiß abnehmen wird. Leider kann man bei allen geprüften Proben, wegen Zeitmangel, nichts über das Langzeit-Verschleißverhalten sagen. Dort könnte sich ganz ein anderes Bild zeigen. Aufgrund der Kenntnisse über die Werkstoffe, die Oberflächenhärtung und die Geometrien, wird sich die Rangfolge bestimmt noch - vielleicht sehr stark- ändern.

Man kann über diese Probe bei einer Geschwindigkeit von nur 14% die Vermutung anstellen, dass sich aufgrund des Schmiedegrates, bei solch einer geringen Geschwindigkeit, deutlich mehr Material ablöst. Es wird sicher noch notwendig sein, noch mehrere Proben zu prüfen, deutlich länger und mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten, um genauere Aussagen darüber machen zu können, warum sich der Verschleiß hier so verhält. Eine weitere Möglichkeit ist, dass bei geringeren Geschwindigkeiten eher eine Verkantung der Kettenglieder, zum Beispiel durch den Schmiedegrat, stattfindet, wodurch mehr Material abgetragen wird. Es kann nur durch Reibphänomene dazu kommen, dass bei einer geringeren Geschwindigkeit, obwohl sonst alle Parameter gleich belassen wurden, sich der Verschleiß so entwickelt. An dieser Stelle sollte auch

noch erwähnt werden, dass sich alle Härteverläufe in der Toleranz befunden haben, was bedeutet das auch hier keine Erklärung gefunden werden kann, warum diese eine Probe, entgegen aller Erwartungen, so stark vom Verschleiß betroffen ist. Alles was sein kann ist, dass die Einsatzhärteschicht sich im unteren Bereich der Toleranz befand.

Es wird hier notwendig sein, dass man alle Proben in den Langzeitverschleißbereich führt, dort wird man dann erkennen, ob es sich bis zu diesem geprüften Zeitpunkt noch um zu wenig Verschleiß gehandelt hat. Die Erwartungshaltung ist in den höheren Prozenten des Verschleißes sind jene, dass die Schmiedegeometrien besser abschneiden, als die Rundstahlkette. Auch die geringere Hubgeschwindigkeit der U1TE Geometrie, welche versucht wurde, sollte im Langzeitverschleiß eher von Vorteil, als von Nachteil sein. Abbildung 93 zeigt die geprüfte Probe der U1TE-U1TC-Geometrie bei einer Hubgeschwindigkeit von 14%.



Abbildung 93: geprüfte U1TE-U1TC-Geometrie, Hubgeschwindigkeit 14%

Das Balkendiagramm (Abbildung 94), wo alle Prüfkörper, bei einer Zyklenzahl von 188500, auf die Rundstahlkette bezogen werden, dient zur übersichtlichen Darstellung des Verschleißes. Hier sieht man schnell, wie deutlich sich die Verschleißraten zu diesem Zeitpunkt unterscheiden. Warum sich die Verschleißraten so unterscheiden, liegt sicher an metallurgischen Phänomenen, also am Werkstoff und an der erzeugten Oberflächenhärte, es kann aber auch durch die Geometrie dazu kommen, also das sich ein spezielles Reibverhalten ausbildet, dies geschieht durch die mechanischen Gegebenheiten (Reibung). Zu diesem Zeitpunkt ist die Rundstahlkette der klare Favorit, gefolgt von der U1TC-U1TE-Geometrie und die U1TB-U1TA-Geometrie bei 30% Geschwindigkeit, auf dem letzten Platz findet man stark abgeschlagen die U1TC-U1TE-Geometrie bei einer Geschwindigkeit von 14%. Die Rundstahlkette muss zu diesem Zeitpunkt der Favorit sein, da sie die höchste Oberflächenhärte besitzt.

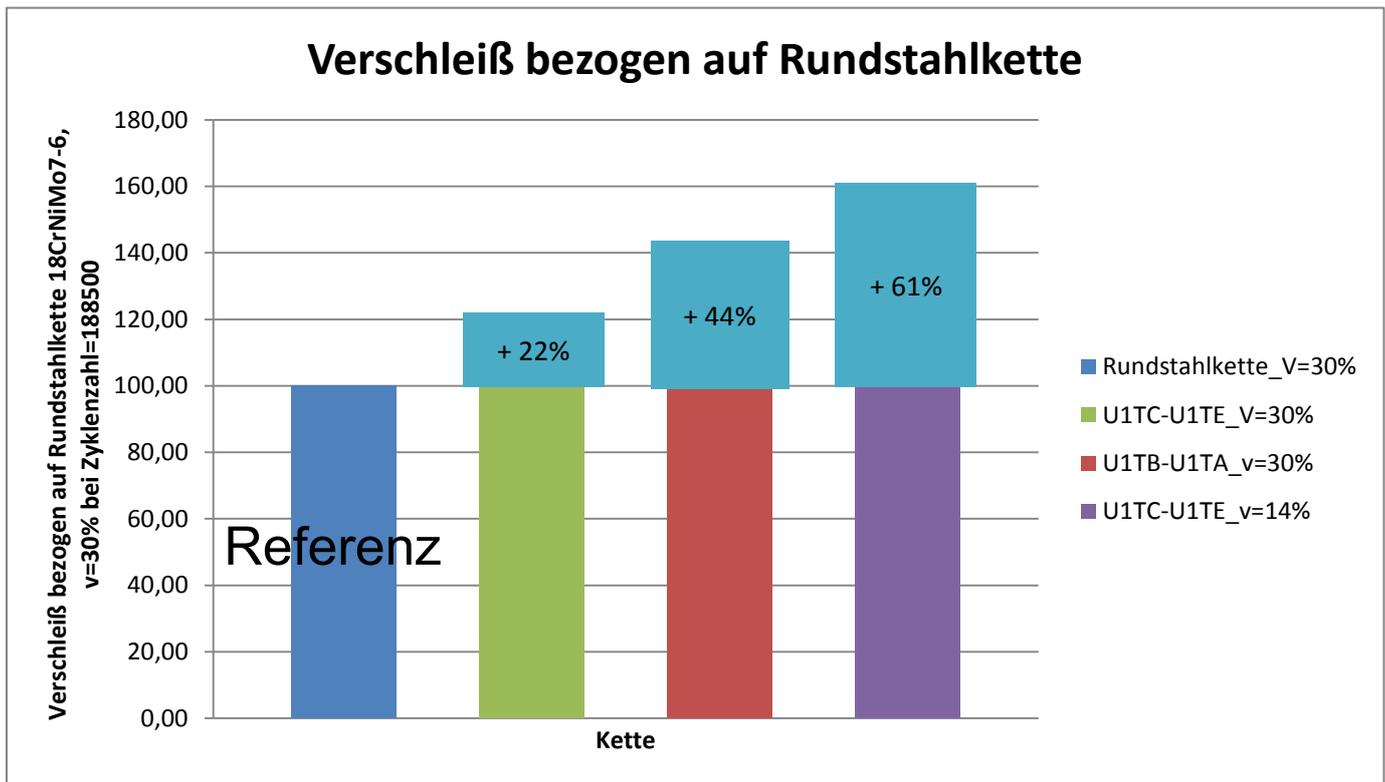


Abbildung 94: Verschleiß bezogen auf Rundstahlkette

In der Abbildung „Verschleißmessung-Trend“ (Abbildung 95) hat man einen Mittelwert aus den Verschleißverläufen der Schmiedegeometrien (Hero-Ketten) entwickelt. Diese kann man zusammenführen, da die Geometrie der einzelnen Glieder relativ gleich ist, und die Temperatur noch keinen wesentlichen Einfluss auf den Verschleiß hat. Auch die Einsatzhärtetiefe und der Werkstoff sind gleich. Hier erkennt man, dass sich am Anfang, die Rundstahlkette und die anderen Geometrien gleich verhalten, erst nach einer gewissen Zeit beginnt die Verschleißkurve der Rundstahlkette abzuflachen, während die der Schmiedegeometrien ansteigen. Zum Ende hin, dreht sich dies aber um.

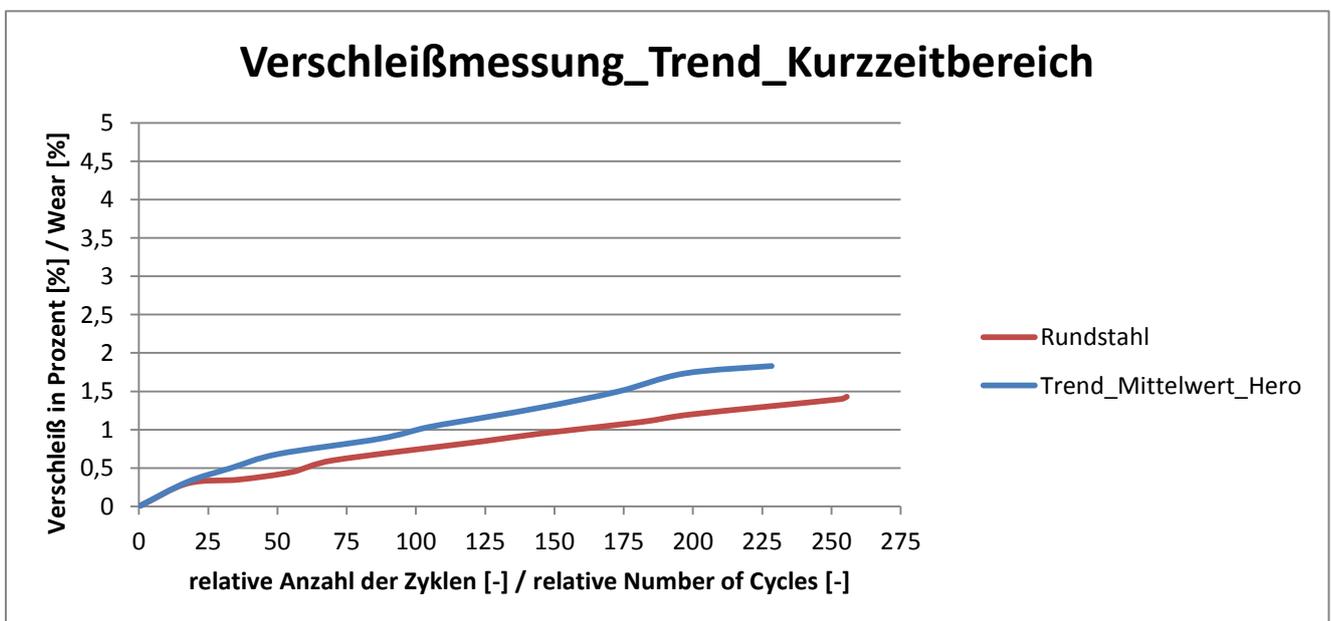


Abbildung 95: Schmiedegeometrien-Trend vs. Rundstahlkette

In der Abbildung, wo man die Verschleißübersichten der Vollglieder und Halbglieder vorfindet (Abbildung 96), soll geklärt werden, wie die einzelnen Glieder verschleissen. Als Referenz bezieht man sich auf das Kettenglied mit dem geringsten Verschleiß, auf das Außenglied der Rundstahlkette. Diesem gegenübergestellt, alle anderen geprüften Kettenglieder. Man hat dazu jeweils die Nenndicke der ungeprüften Seite, mit der Dicke der geprüften Seite, jeder Probe, verglichen.

Hat man am Ende Innen –und Außenglied jeder Kette gemessen und den Verschleiß notiert, musste der Gesamtverschleiß jedes Prüflings (=Inne –und Außenglied jeder Probe) wieder dem Verschleiß aus dem Schwenktribometer entsprechen. Das macht man deswegen, weil der Schwenktribometer nicht den Verschleiß jedes einzelnen Gliedes angibt, sondern nur den Gesamtverschleiß. Darum diese einzelne Vermessung der Dicken. Einer der interessanten Aspekte hier ist, dass die Innenglieder (Halbglieder) um einiges mehr verschleißt sind, als die Außenglieder (Vollglieder). Ein Grund dafür kann sein, dass das Vollglied eingespannt ist, während sich das Halbglied auf und ab bewegt. Das Vollglied ist also in einer günstigeren Position was die Kraft- und Wärmeableitung angeht. Die Geometrie ist wahrscheinlich nicht verantwortlich für den Verschleißunterschied, da die Rundstahlglieder komplett ident sind und dennoch beträgt die Verschleißdifferenz ganze 32%.

Die Grafiken zeigen, dass bei den Vollgliedern am Zweitbesten das U1TC Kettenglied mit einer Hubgeschwindigkeit von 14% abschneidet, trotzdem ist der Verschleiß in Relation bereits um 24% höher, als der Verschleiß des Rundstahlketten-Außengliedes. An dieser Stelle sollte erwähnt werden, dass man durch die geringe Hubgeschwindigkeit, nicht auf dieselbe Anzahl an Zyklen gekommen ist, dies bedeutet, der Verschleiß müsste bei dieser Probe eigentlich höher angenommen werden. Das U1TA Kettenglied, sowie das U1TC Kettenglied, mit der gleichen Hubgeschwindigkeit von 30%, schnitten mit 32% mehr Verschleiß gegenüber des Rundstahlgliedes gleich ab.

Bei den Halbgliedern sieht es anders aus, war bei den Vollgliedern das U1TC Kettenglied, mit 14% Hubgeschwindigkeit, vorn, schneidet das dazugehörige Halbglied, mit der U1TE Geometrie, am schlechtesten ab. Ganze 48% mehr Verschleiß erreichte dieses Kettenglied gegenüber dem Rundstahlkettenglied. Das beste Halbglied, war das Gegenstück zum Vollglied der Rundstahlkette. Sie haben dieselbe Geometrie und trotzdem einen doch sehr unterschiedlichen Verschleiß. Das Halbglied hat um ganze 32% mehr Verschleißerscheinungen.

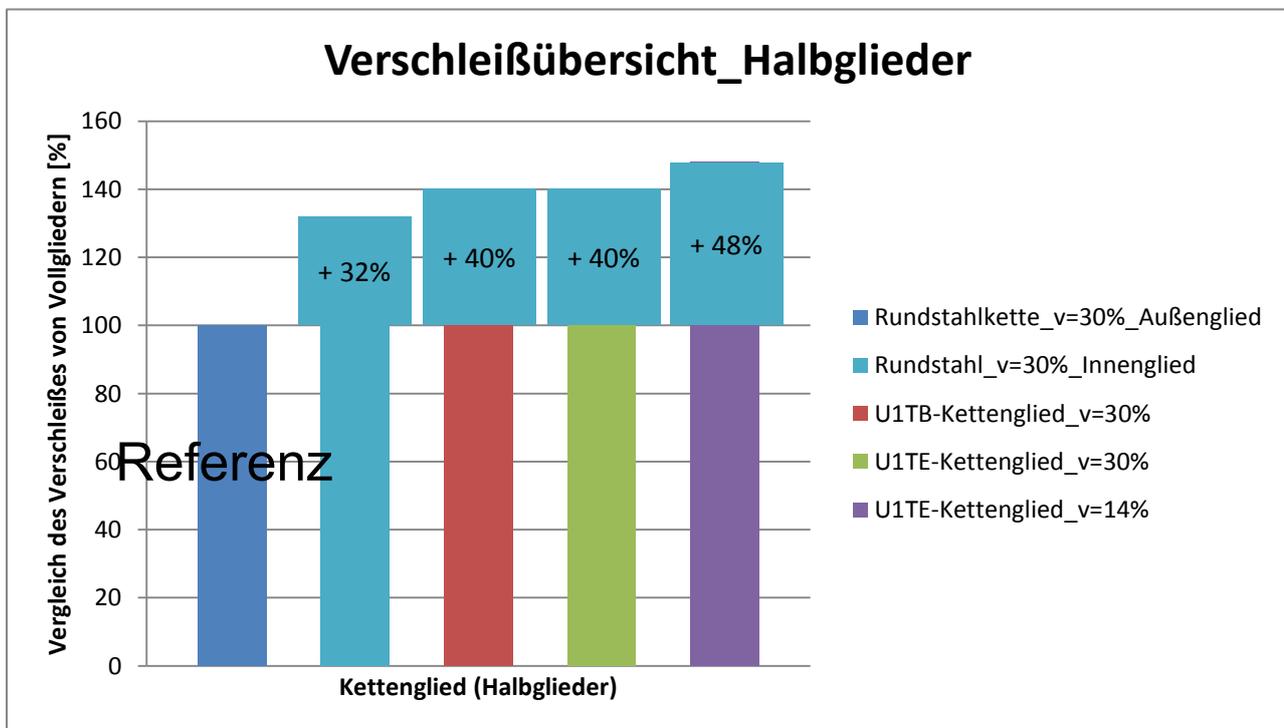
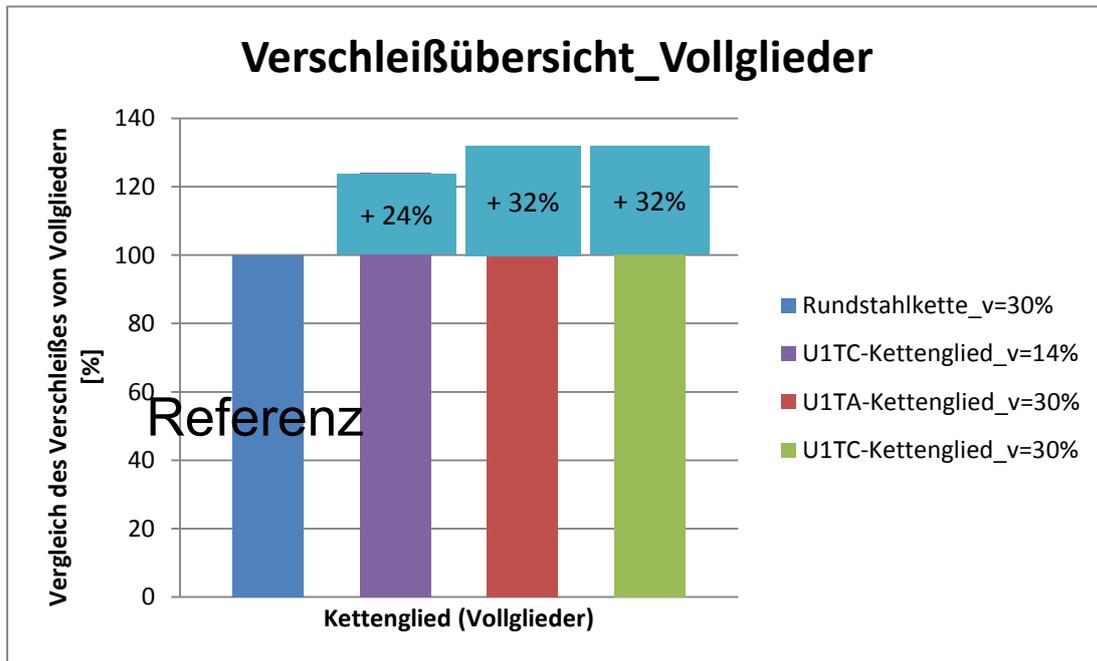


Abbildung 96: Verschleißübersichten Vollglieder und Halbglieder

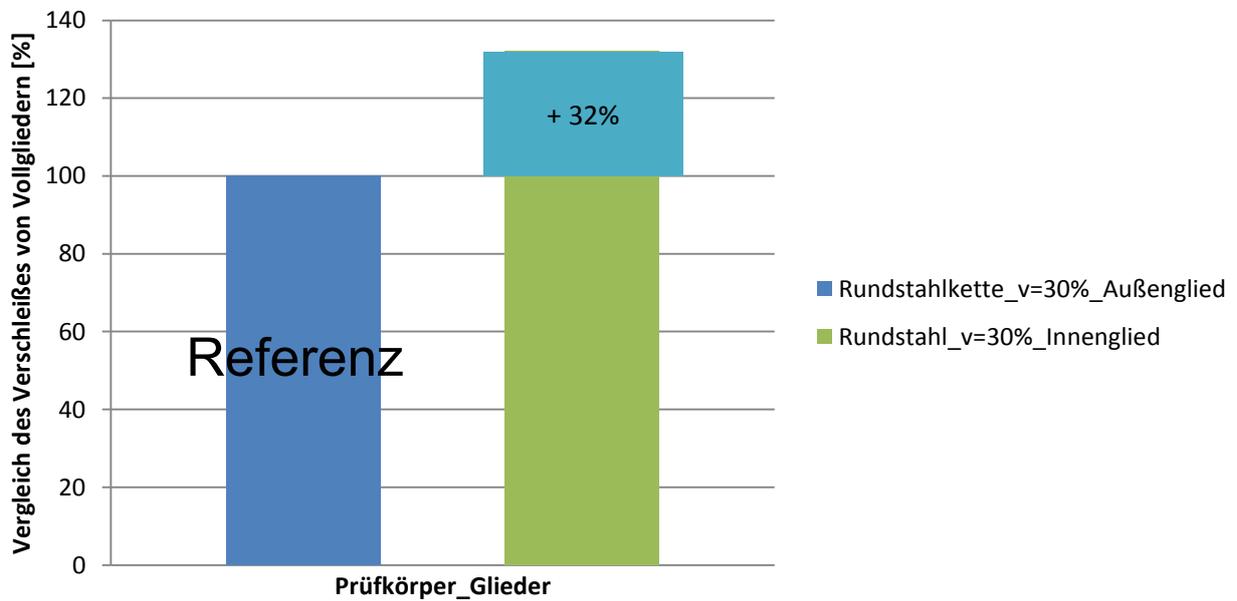
Wiederum den gleichen Verschleißwert haben die Halbglieder U1TB und U1TE, bei einer Hubgeschwindigkeit von 30%, mit einem Plus von 40% mehr Verschleiß im Bezug auf die Rundstahlkette. Würde man also nach Geometrie und Werkstoff gehen, wäre das U1TE Kettenglied bei einer Hubgeschwindigkeit von 14% das Glied, welches am meisten vom Verschleiß betroffen war. Die Rundstahlkette schnitt, zu diesem Zeitpunkt, am besten ab. Bei diesen beiden Prüfkörpern, sind sowohl Geometrie, als auch Werkstoff und die Einsatzhärteschicht unterschiedlich.

Erstaunlich ist, obwohl die Rundstahlkette den geringsten Verschleiß hat, weichen die Glieder, einzeln gesehen, am meisten voneinander ab, ganze 32%. Das würde wieder den Verdacht erhärten, dass hier adhäsiver Verschleiß eine Rolle spielt. Die beiden Kettenglieder sind komplett ident und der adhäsive Verschleiß benötigt genau diese Eigenschaft. Ein weiterer Grund könnte sein, dass das Vollglied eingespannt ist und das Halbglied nicht, dadurch wird beim Vollglied die Wärme besser abgeführt (geringere Temperatur bedeutet geringeren Verschleiß). Bei einer Hubgeschwindigkeit von 14%, haben die Kettenglieder U1TE-U1TC die zweitgrößte Differenz, diese beträgt 24%. Wenn man sich den Verschleiß der einzelnen Prüfkörper und die Glieder untereinander ansieht, schneiden die U1TE-U1TC und U1TB-U1TA Ketten am besten ab, diese weichen nur 8% voneinander ab.

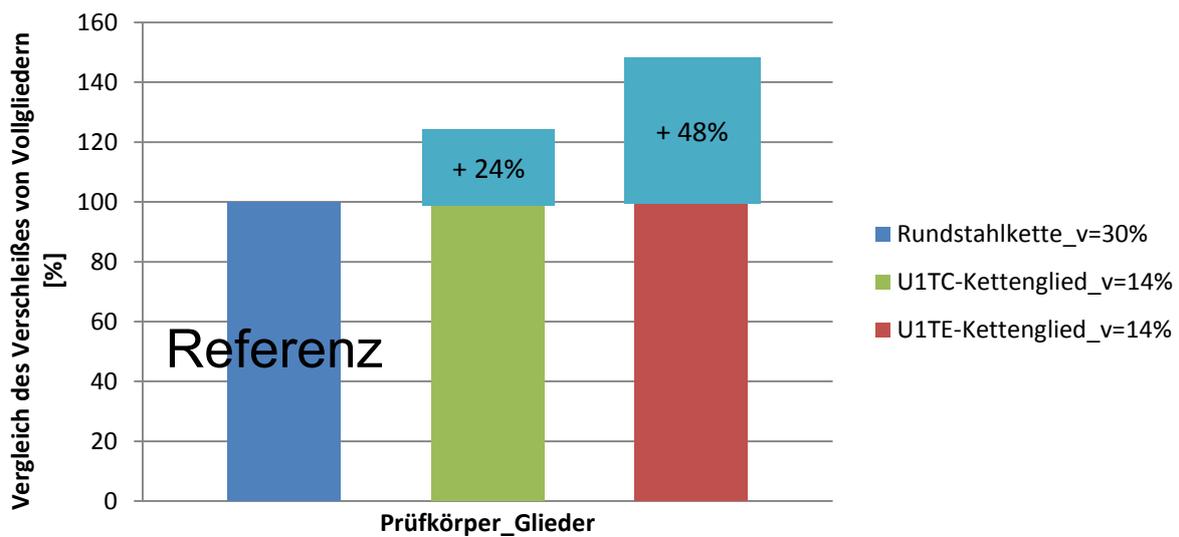
Während man bei den Darstellungen der Halb –und Vollglieder, in den Balkendiagrammen, vom Gesamtverschleiß ausgeht, bezieht man sich bei dem Balkendiagramm der gesamten Prüfkörper (Innen –und Außenglied) auf den Verschleiß bei genau 188500 Zyklen. Dies soll nur ein Hinweis sein, warum die Relationen nicht übereinstimmen.

Abbildung 97 zeigt wie die einzelnen Glieder sich untereinander verhalten, also immer das Voll –und Halbglied der jeweiligen geprüften Kette, im Vergleich zum Referenzglied (Rundstahl-Außenglied).

Verschleiß_Kettenglieder_Rundstahl



Verschleiß_Kettenglieder_U1TC_U1TE_v=14%



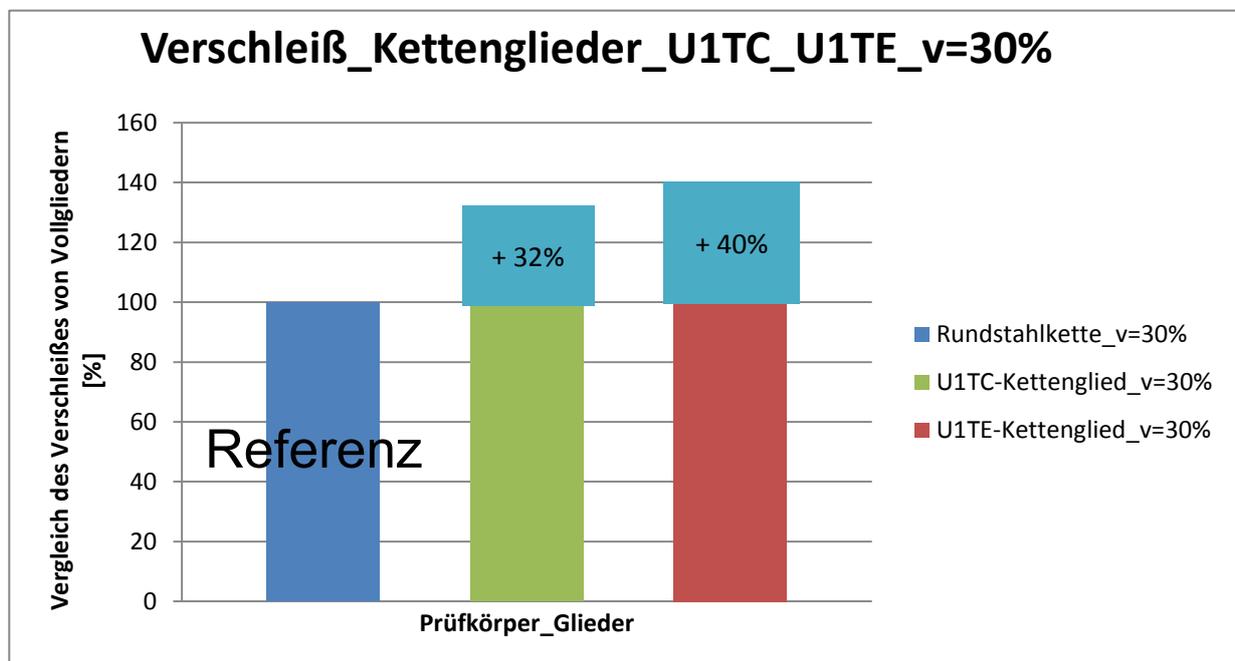
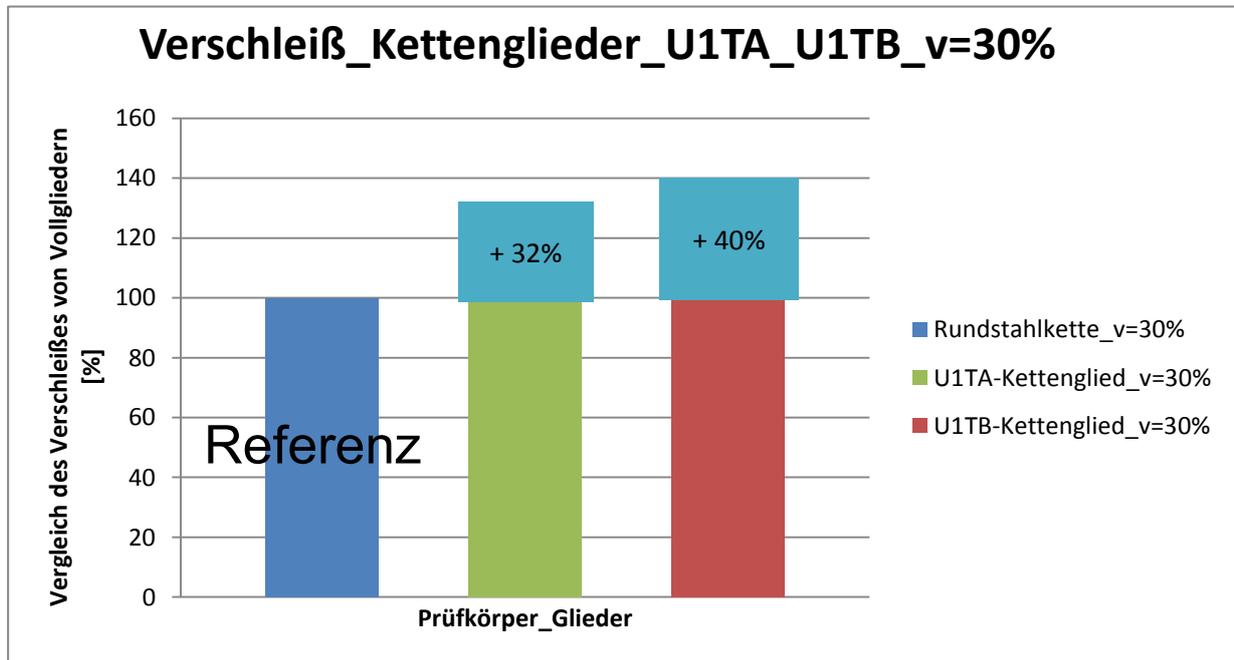


Abbildung 97: Übersicht des Verschleißes der Kettenglieder zueinander

5.3.1.3 Verschleißprüfung im Langzeitbereich

Hier versucht man, die Rundstahlkette aus 18CrNiMo7-6 und die U1TC-U1TE-Geometrie (Hero-Kette) aus 18CrNiMo7-6, länger als zwei Wochen zu prüfen und diese Daten auszuwerten, sowie schließlich den Ausgang zu interpretieren. Das Verschleißbild (Abbildung 98), was sich nach dem Verschleißfortschritt zeigt, ist bei allen Proben gleich. Man erkennt Furchungverschleiß, aber auch Pittings aufgrund der lokal auftretenden Spannungsspitzen.

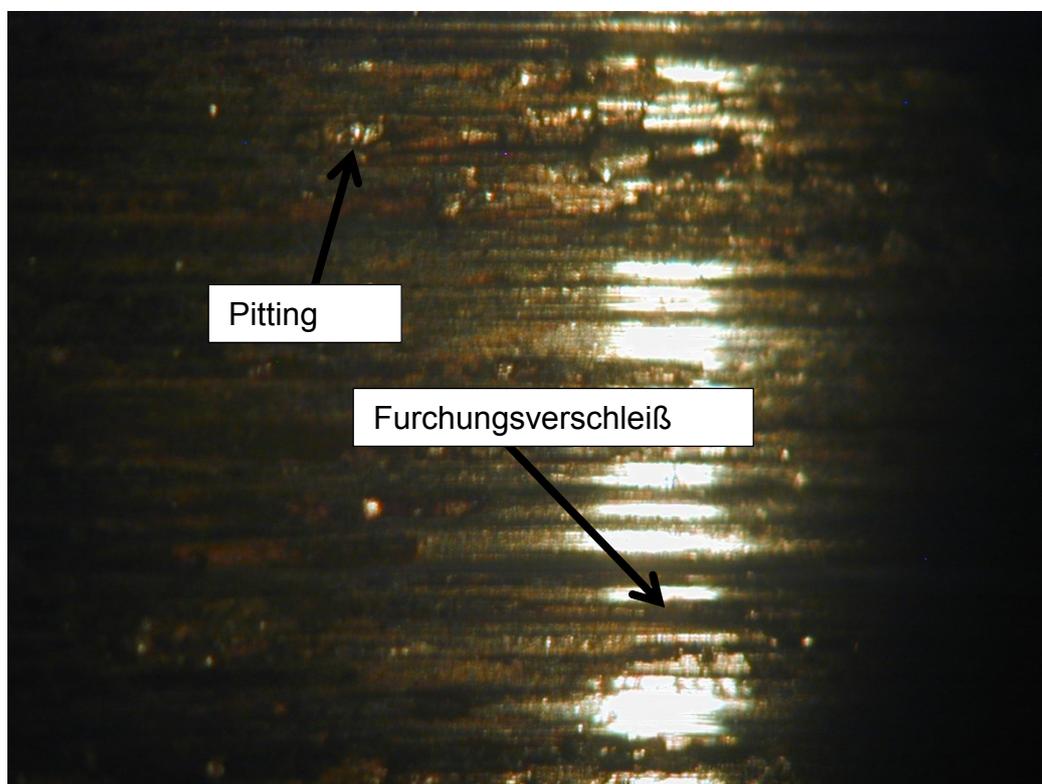


Abbildung 98: Kettenoberfläche

Im Kurzzeitbereich hatte die Rundstahlkette den Vorteil, dass ihre Oberflächenhärte höher war als die der anderen Ketten. In diesem Kapitel haben die Rundstahlkette und die Hero (18CrNiMo7-6) denselben Härteverlauf. Abbildung 99 zeigt die beiden verwendeten Werkstoffe und ihre Härteverläufe. Je mehr Material abgetragen wird, desto geringer wird die Härte, was bedeutet, dass der Verschleiß zunimmt. Die Grundhärte des 30CrNiMo8 ist höher als die des 18CrNiMo7-6, Grund dafür ist der Kohlenstoffgehalt.

Im Kapitel 5.3.2 erkennt man, dass der 30CrNiMo8, aufgrund des deutlich höheren Kohlenstoffgehaltes und der modifizierten Geometrie, bei der Bruchkraft am besten abschneidet. Wie bereits bekannt, wurden bei diesen Versuchen die Ketten einsatzgehärtet. Der Härteverlauf der Rundstahlkette und der Hero (18CrNiMo7-7) ist deswegen höher, weil mehr Kohlenstoff in die Randschicht eindiffundiert ist (längere Einwirkdauer).

Vergleich_Härteverlauf

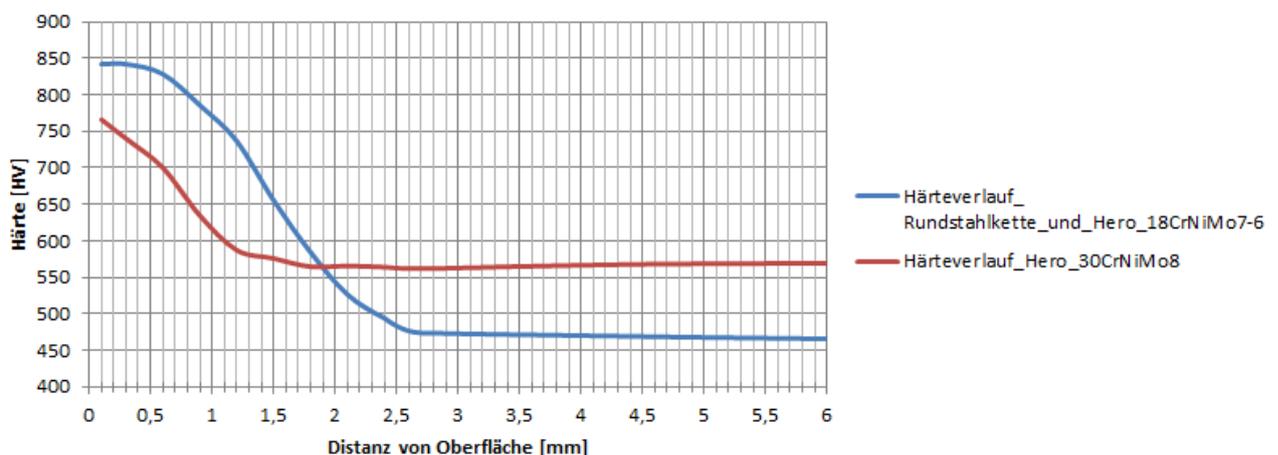


Abbildung 99: Härteverläufe

Die Hero-18CrNiMo7-6, sowie die Rundstahlkette wurden aus demselben Werkstoff hergestellt, auch die Reibungstemperatur wurde gleich eingestellt. Härteschicht und Härteverlauf sind, wie schon bekannt, ident. Der einzige Unterschied dieser beiden Ketten liegt in der Geometrie. Die Rundstahlkette (Abbildung 86) besitzt die bekannte gleichmäßige Form, während die Hero-18CrNiMo7-6 (Abbildung 84) eine äußerst komplexe Geometrie aufweist. Die Firma Pewag ist im Stande Ketten herzustellen die komplex sind, aber den Vorteil haben, dass sie so eine geringere Flächenpressung im Laufe ihrer Einsatzzeit erhalten, dadurch nimmt der Verschleiß ab. Dieser Versuch soll zeigen, ob allein die Geometrieänderung ausreicht, um den Verschleiß zu minimieren. Abbildung 100 zeigt den Prüfungsausgang des Versuches.

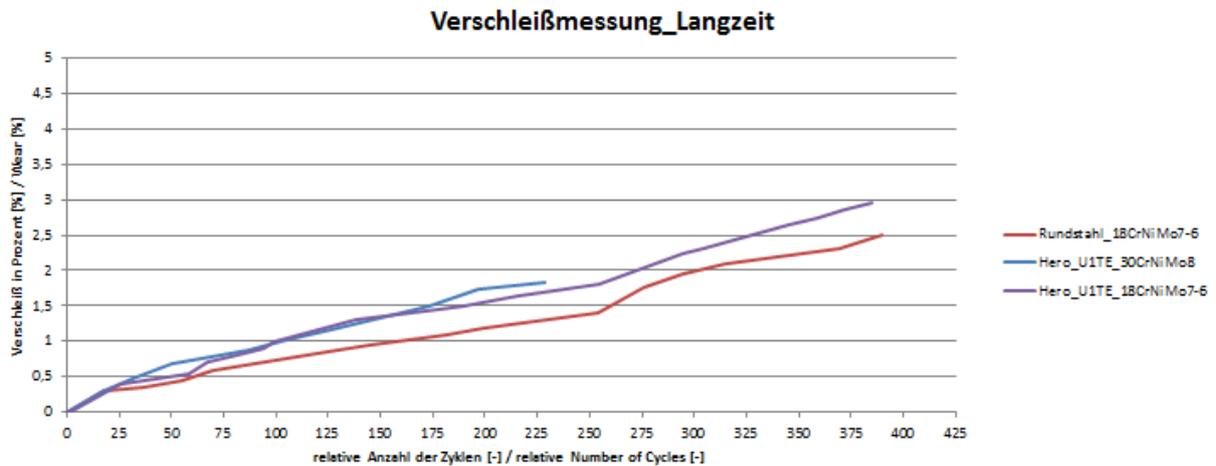


Abbildung 100: Langzeitverschleißprüfung

In der Abbildung 100 wurde bewusst die Hero-Kette aus dem Werkstoff 30CrNiMo8 eingeblendet gelassen, um zu zeigen bis wohin der Kurzzeitversuch gegangen ist. Der Versuch hat gezeigt, dass der Schmiedegrat, den die Hero-18CrNiMo7-6 besitzt, keinen negativen Einfluss auf das Verschleißverhalten hat. Rundstahl und Hero-18CrNiMo7-6 haben am Anfang des Versuches denselben Anstieg. Der Schmiedegrat beträgt ungefähr 0,2mm. Bis zu dem Ende dieses Versuches muss man sagen, dass die veränderte Geometrie keinen Vorteil gegenüber der Rundstahlkette bewirkt. Der Verschleiß ist um 21% höher als die der Rundstahlkette (Abbildung 101).

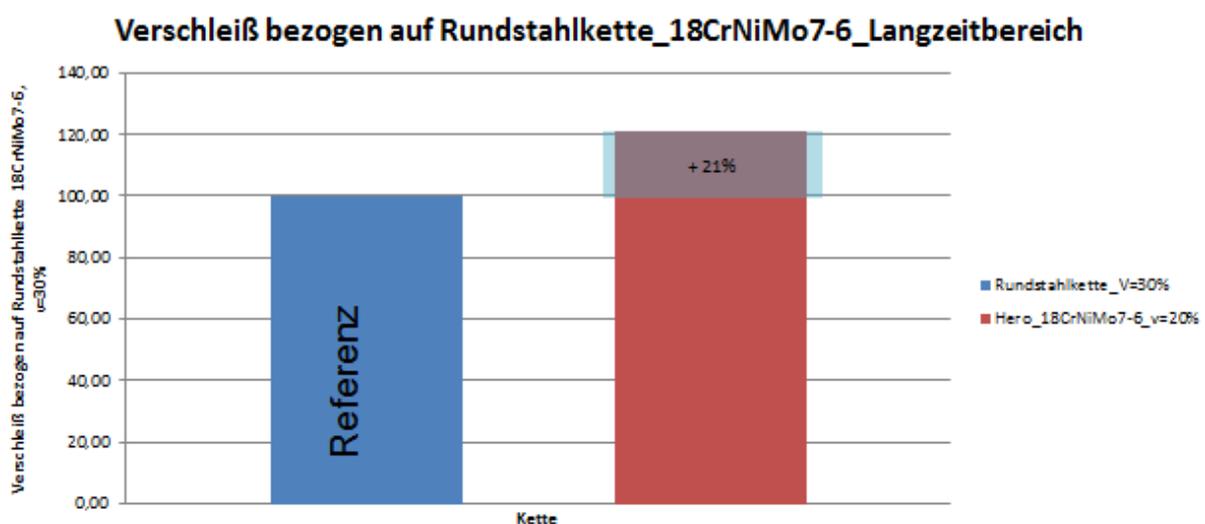
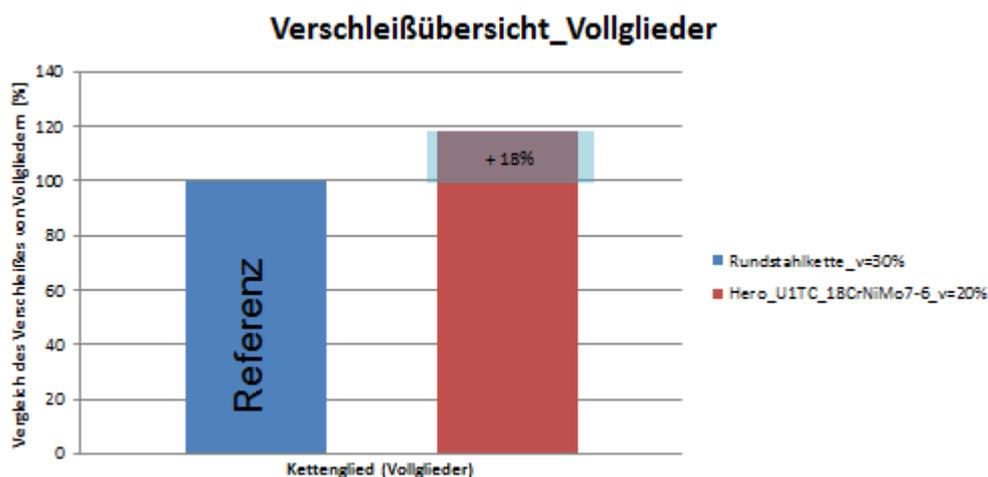


Abbildung 101: Verschleiß bezogen auf Rundstahlkette

Man erkennt, dass bei ungefähr 255000 Zyklen der Verschleiß deutlich zunimmt, Grund dafür kann der doch starke Abfall der Härte sein, welcher in diesem Bereich zu erkennen ist. Man konnte auch erkennen, dass wenn man den Versuch unterbrochen hatte, der Verschleiß wieder deutlich Anstieg bevor er sich wieder in ein Gleichgewicht begeben hat. Die Begründung ist jene, dass durch die erhöhte Temperatur, welche sich nach einiger Zeit einstellt, das Gefüge vor Kaltverschweißung schützt. Am Anfang jedes Versuches kommt es zu extremen Pitting, die Materialpartikel werden regelrecht herausgebrochen. Dadurch steigt die Verschleißgeschwindigkeit bei jedem neuen Hochfahren der Kette zu Beginn stärker an. Gleiches Bild zeigt sich auch bei 370000 Zyklen an der Rundstahlkette.

Man hat sich auch den Verschleiß der einzelnen Glieder genauer angesehen und auch hier erkennt man, wie schon im Kurzzeitversuch, dass die Halbglieder mehr Verschleiß als die Vollglieder. Der genaue Grund dafür ist fraglich, vielleicht ist die verbesserte Temperaturabführung eine Ursache dass die Vollglieder weniger Verschleiß, es kann aber auch daran liegen, dass sich das Halbglied auf und ab bewegt hat und dadurch der Verschleiß stärker ausfällt, da das Vollglied fest eingespannt war. Am besten schnitt das Vollglied der Rundstahlkette ab, auf dieses Glied hat man in den nachfolgenden Abbildungen den Verschleiß bezogen (Abbildung 102).



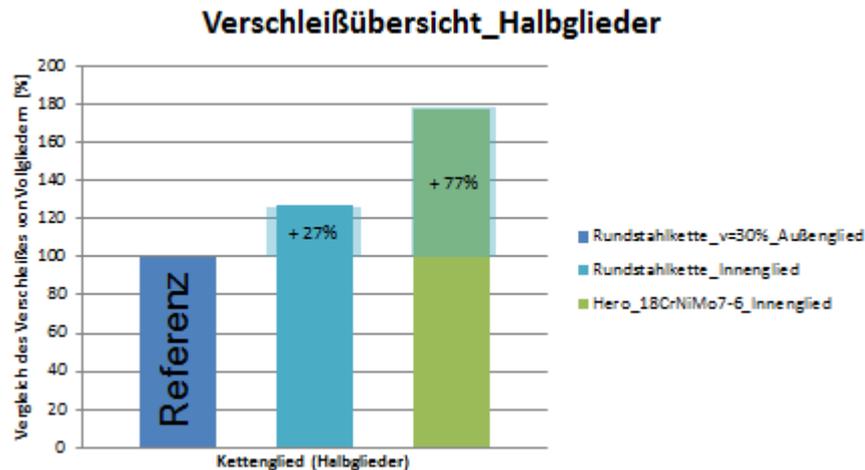


Abbildung 102: Verschleiß Voll- und Halbglieder

Durch diese Übersichten erkennt man auch wieder, wie schon im Kurzzeitbereich, dass die Glieder unterschiedlich verschleißen. Der adhäsive Verschleiß wird mit Sicherheit einen großen Einfluss haben und ist in weiteren Versuchen auf jeden Fall noch zu untersuchen. Die Idee ist ganz einfach die, dass man unterschiedliche Materialien und vielleicht auch Oberflächenhärten der einzelnen Glieder verwendet.

Wie man an der Abbildung 102 erkennt, wirkt sich die Flächenpressung am Hero_18CrNiMo7-6_Innenglied stark aus. Durch die neue Geometrie sind die Glieder wesentlich höheren Reibkräften ausgesetzt. Trotzdem zeigt sich aus FEM-Daten, dass sich in Summe die Flächenpressung deutlich vermindern sollte und schlussendlich geringer ausfallen soll, als die der Rundstahlkette.

Die Vermutung dafür, dass die Hero-18CrNiMo7-6 im weiteren Verschleißfortschritt sich besser verhalten wird als die Rundstahlkette, erhält man wenn man sich die Verschleißgeschwindigkeit über den Verschleißfortschritt ansieht (Abbildung 103).



Abbildung 103: Verschleißgeschwindigkeit

Aufgrund der Verschleißgeschwindigkeiten lässt sich die Vermutung anstellen, dass die Geometrie der Hero-18CrNiMo7-6 deutlich schneller einpendelt und dadurch der Verschleißfortschritt schneller abnimmt, als jener der Rundstahlkette. Hier liegt der Verdacht nahe, dass im weiteren Verschleißfortschritt die Rundstahlkette mit dem Anstieg der Zyklenzahl schlechter abschneiden wird.



Egal ob man den Gesamtverschleiß, oder den Verschleiß der einzelnen Glieder betrachtet, spiegelt sich immer ein ähnliches Bild der Verschleißgeschwindigkeit.

Wenn man auch noch die bessere Bruchkraft der Hero-Kette heranzieht, ist diese Kette sicherlich besser für den Einsatz geeignet als die Rundstahlkette, auch wenn man dies zu diesem Zeitpunkt der Verschleißprüfung noch nicht ganz sieht.

Zusammenfassend kann man über diesen Langzeitversuch sagen, dass hier die Notwendigkeit besteht im Weiteren noch mindestens doppelt so lange zu prüfen, als es bis jetzt der Fall ist. Die Geometrie der Hero-Kette wird aufgrund der Verschleißgeschwindigkeit noch eine bessere Performance liefern und da der Verschleiß im Betriebsfall deutlich höher ausfällt, hat die Hero-Kette noch viel Spielraum, um ihre abfallende Flächenpressung und die damit verbessernde Verschleißperformance zur Geltung zu bringen. Bei der Geometrie könnte man vielleicht noch versuchen, die Radien besser einzustellen umso die Flächenpressung noch schneller zu minimieren und dadurch von Anfang an einen geringeren Verschleißfortschritt zu gewährleisten. Aus dem Kurzzeitversuch der Hero-30CrNiMo8 sieht man, dass diese Kette und die Hero-18CrNiMo8 ein relativ gleiches Verhalten zeigen, womit man wieder die Vermutung anstellen kann das die Geometrie noch zu wenig Zeit hatte ihre Verschleißminderung laut den FEM-Daten zu realisieren. Die Hero-30CrNiMo8 hat einen anderen Härteverlauf als jene der beiden anderen geprüften Ketten, wodurch hier die Vermutung angestellt werden kann das diese, aufgrund ihrer höheren Grundhärte am besten abschneiden wird. Aufgrund des Zeitmangels konnte das jedoch nicht überprüft werden.

5.3.2 Kettenzugprüfmaschine

Die Daten der Zugprüfkörper, die an der Kettenzugprüfmaschine, welche im Kapitel 5.3.2.3 besprochen wurde, durchgeführt worden sind, werden in diesem Kapitel ausgewertet. Eine wichtige Anforderung ist es, dass die Prüfkörper nicht an der Schweißstelle versagen, sondern Aufgrund der Überbelastung des Grundgefüges brechen. Die Zugprobe dient also als Evaluierung der Schweißnahtqualität. Das Grundgefüge besteht aus der jeweiligen Legierung, welche für die Kette gewählt wird. Durch das Verschweißen kann es zu einer Änderung des Gefüges kommen. Abbildung 104 zeigt, wie zum Beispiel ein schönes Bruchbild aussehen kann.



Abbildung 104: Bruchbild nach einem Kettenzugversuch

Nach dem Zugversuch ist entscheidend, dass die Kette die notwendige Bruchkraft erreicht. Ketten sind oft mit sehr hohen Sicherheitsfaktoren belegt. Sollte die Bruchkraft nicht erreicht werden, unter Beachtung der Sicherheit, kann die Kette nicht eingesetzt werden. Die folgenden Daten werden in einem Kraft-Verlängerungsdiagramm dargestellt. Man erhält aus dieser Zugprüfmaschine aber auch Daten für das Spannungs-Dehnungsdiagramm. Die unterschiedlichen Startwerte der Versuche ergeben sich aus dem zuvor benötigten Kalibriervorgang. Ausgeführt wird dieser Zugversuch nach EN 10002. Zur Erklärung, Kraft heißt im Englischen Force und Länge, oder auch Änderung der Länge, heißt Length beziehungsweise Way.

5.3.2.1 Kettenzugversuch der Rundstahlkette-18CrNiMo7-6

Die Geometrie dieser Kettenglieder sieht folgendermaßen aus: der Durchmesser beträgt 26 Millimeter (mm) bei einer Teilung von 100mm. Der Anfangsquerschnitt des Kettenzugprüfkörpers (Abbildung 105) beträgt 1061 Quadratmillimeter (mm²), die Anfangslänge misst 300mm.

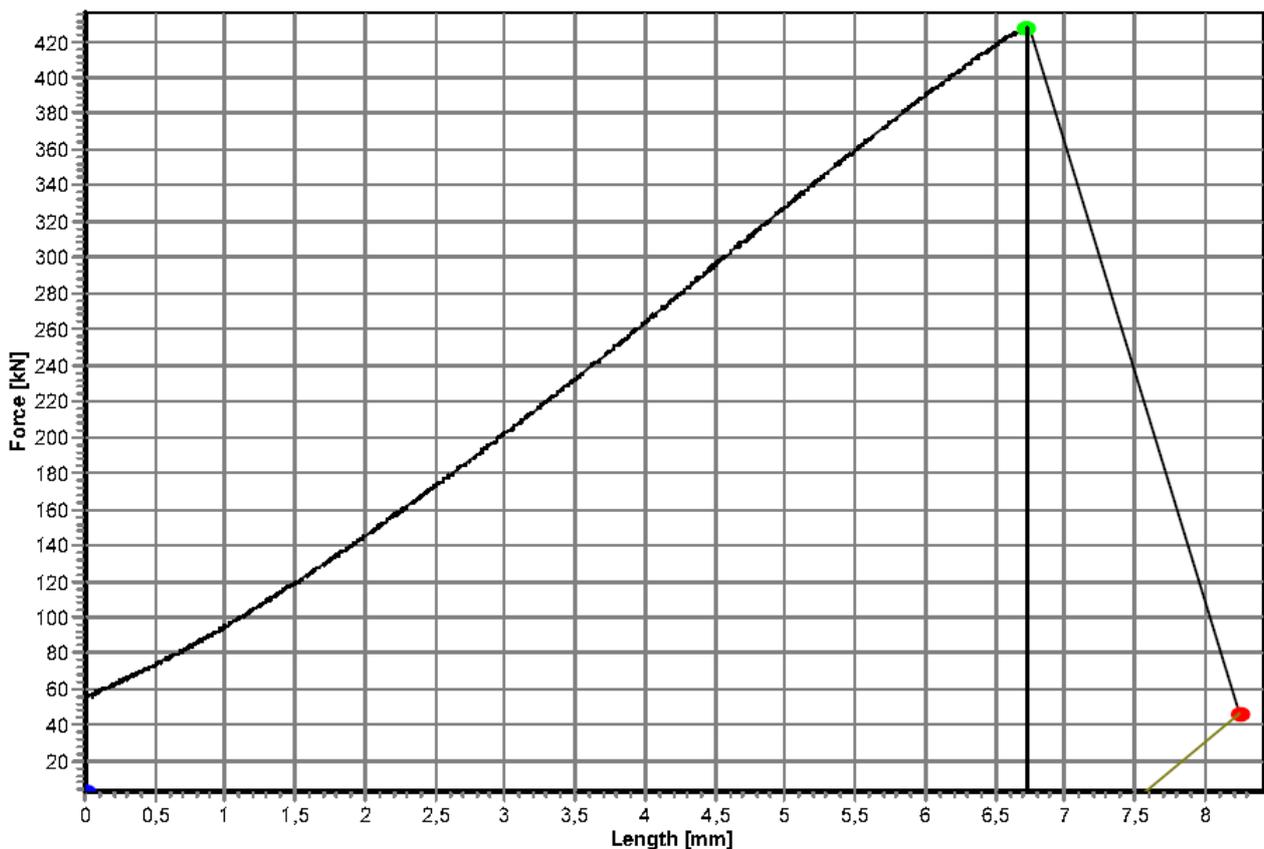


Abbildung 105: Kraft-Verlängerungsprotokoll der Rundstahlkette

Nach dem Zugversuch dieser Kette betrug die Bruchkraft (grüner Punkt im Graphen) 427KN. Bei einem Anfangsquerschnitt von 1061mm² entspricht das einer Zugfestigkeit von 403 Mega-Pascal (MPa). MPa entspricht auch Newton pro Quadratmillimeter (N/mm²). Ab einer Kraft von 46KN verlässt diese Kette den Hook'schen Bereich, die zugehörige Streckgrenze ist bei diesen Prüfparametern somit 44MPa. Die Gesamtdehnung betrug beim Bruch 2,2%. Diese Rundstahlkette hat eine gleichmäßige Geometrie und sie wurde zudem zuvor Einsatzgehärtet. Der Kraftfluss ist nicht gleichmäßig, weshalb diese Kette angreifbar ist wenn es um Überbelastungen geht.

5.3.2.2 Kettenzugversuch der alten Geometrie (U1TA)-30CrNiMo8

Die Geometrie dieser Kettenglieder sieht folgendermaßen aus: der Durchmesser beträgt 26 Millimeter (mm) bei einer Teilung von 100mm. Der Anfangsquerschnitt des Kettenzugprüfkörpers (Abbildung 106) beträgt 1061 Quadratmillimeter (mm²), die Anfangslänge misst 500mm.

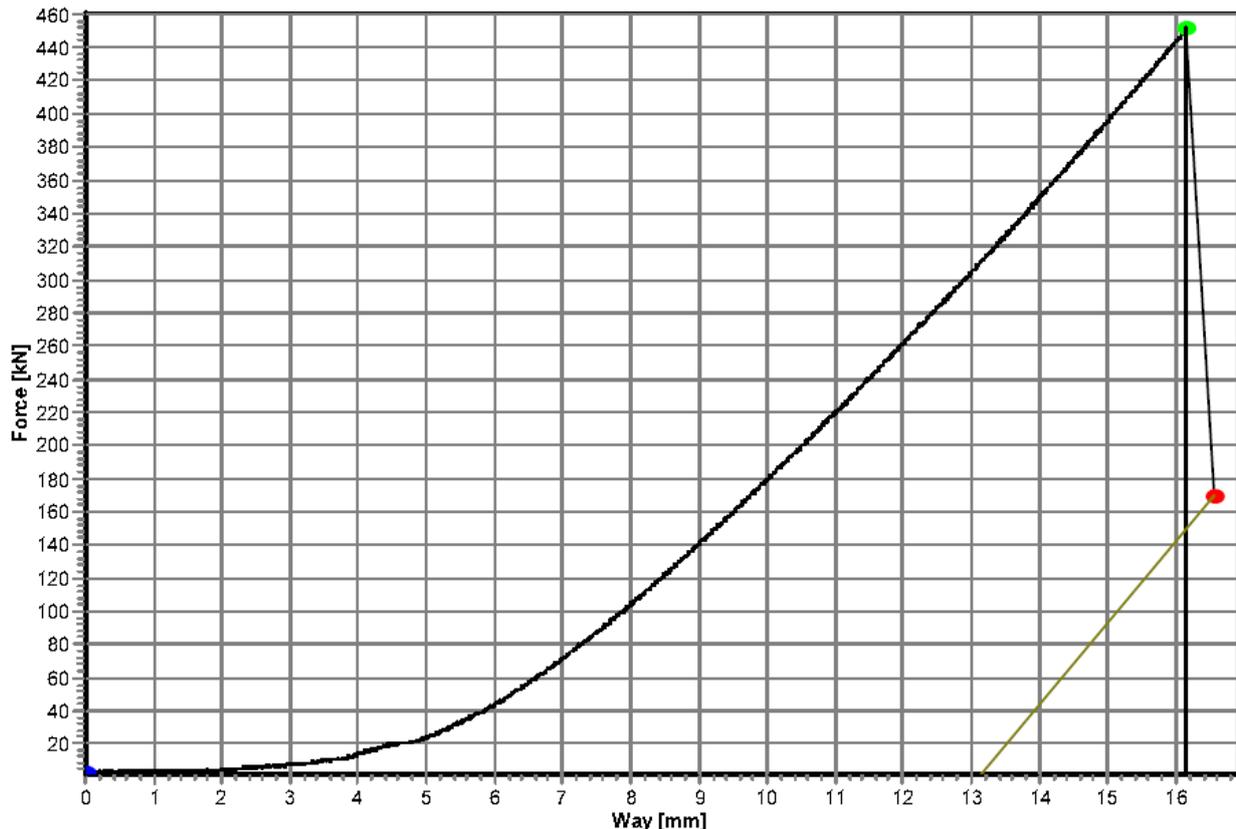


Abbildung 106: Kraft-Verlängerungsprotokoll des U1TA_30CrNiMo8

Dieser Zugversuch der U1TA Kettengeometrie erreichte eine Bruchkraft von 452KN (Zugfestigkeit=426MPa), bei einer Grenzkraft des Hook'schen Bereichs von 170KN (Streckgrenze=160MPa). Die Gesamtdehnung beim Bruch war 1,8%. Auch diese Kette wurde Einsatzgehärtet, jedoch ist diese Kettengeometrie nicht gleichmäßig, sondern aufgrund von FEM Daten (FEM=Finite Elemente Methode) in den Bereichen erhöhter Spannungskonzentrationen, modifiziert worden. Der Zugversuch bestätigt, dass die Dehnung zwar, im Vergleich zu der Rundstahlkette zurückgegangen ist, aber die Zugfestigkeit und Streckgrenze gestiegen sind. Das deutet auf eine erhöhte Lebensdauer gegen Furchungverschleiß und auch Korngleitverschleiß hin, Spröbruchgefahr steigt.

5.3.2.3 Kettenzugversuch der neuen Geometrie (U1TE)-30CrNiMo8

Die Geometrie dieser Kettenglieder sieht folgendermaßen aus: der Durchmesser beträgt 26 Millimeter (mm) bei einer Teilung von 100mm. Der Anfangsquerschnitt des Kettenzugprüfkörpers (Abbildung 107) beträgt 1061 Quadratmillimeter (mm²), die Anfangslänge misst 500mm.

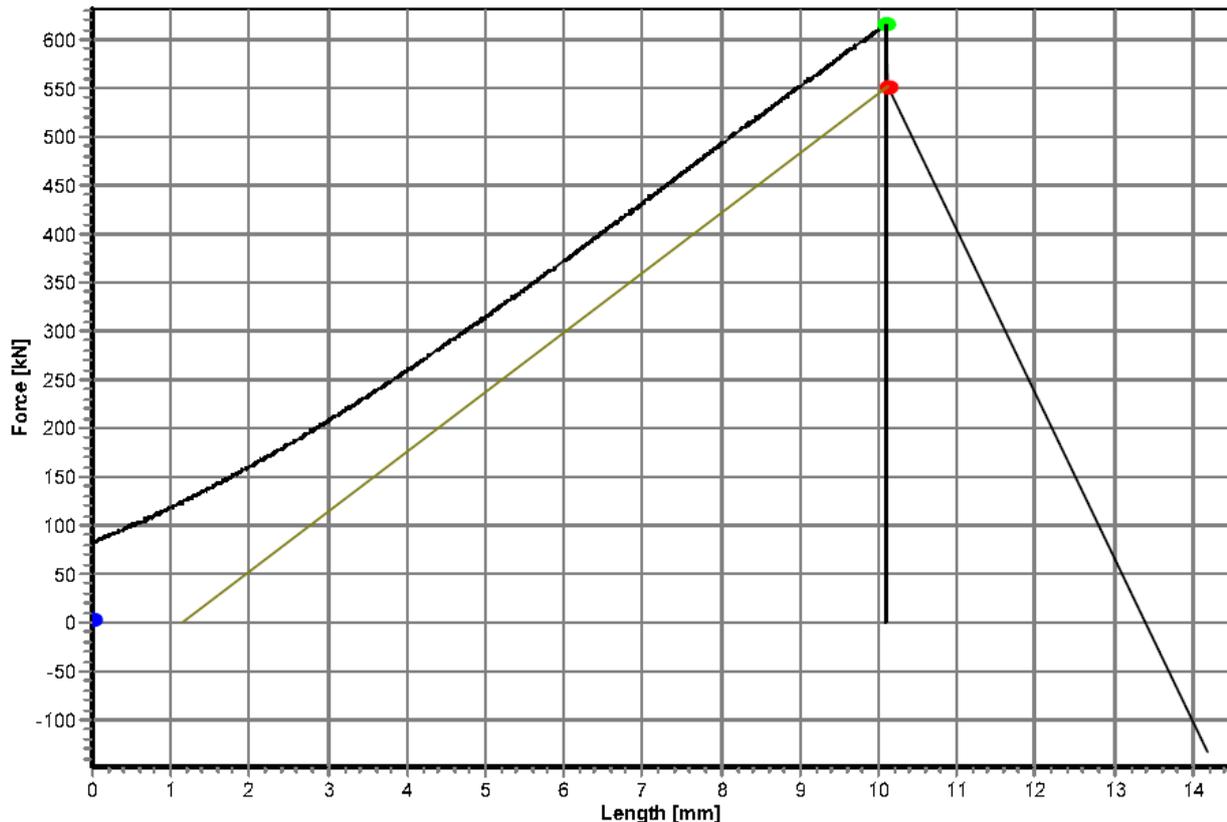


Abbildung 107: Kraft-Verlängerungsprotokoll des U1TE_30CrNiMo8

Die U1TE Kettengeometrie ist in den Berührungspunkten der Kettenglieder nochmals verändert worden. Die Kettenglieder haben weniger Spielraum, der Kraftfluss ist also mehr geführt als zum Beispiel in der U1TA Kettengeometrie und wesentlich gleichmäßiger als in der Rundstahlkette. Hier beträgt die Bruchkraft beachtliche 616kN (Zugfestigkeit=581MPa) und die Kette besitzt eine Grenzkraft von 551kN(Streckgrenze=520MPa). Die Gesamtdehnung bei Bruch beträgt 2%. Die neueste Geometrie wird also von den FEM Daten nicht enttäuscht, sie erreicht in der Realität die höchste Zugfestigkeit bei einer trotzdem sehr guten Dehnung von 2%. U1TE Kettenglieder sind also auf jeden Fall geeigneter, als die zuvor eingesetzten U1TA Glieder, da man auch den gleichen Werkstoff verwendet hat.

5.3.2.4 Kettenzugversuch der neuen Geometrie (U1TE)-18CrNiMo7-6

Die Geometrie dieser Kettenglieder sieht folgendermaßen aus: der Durchmesser beträgt 26 Millimeter (mm) bei einer Teilung von 100mm. Der Anfangsquerschnitt des Kettenzugprüfkörpers (Abbildung 108) beträgt 1061 Quadratmillimeter (mm²), die Anfangslänge misst 500mm.

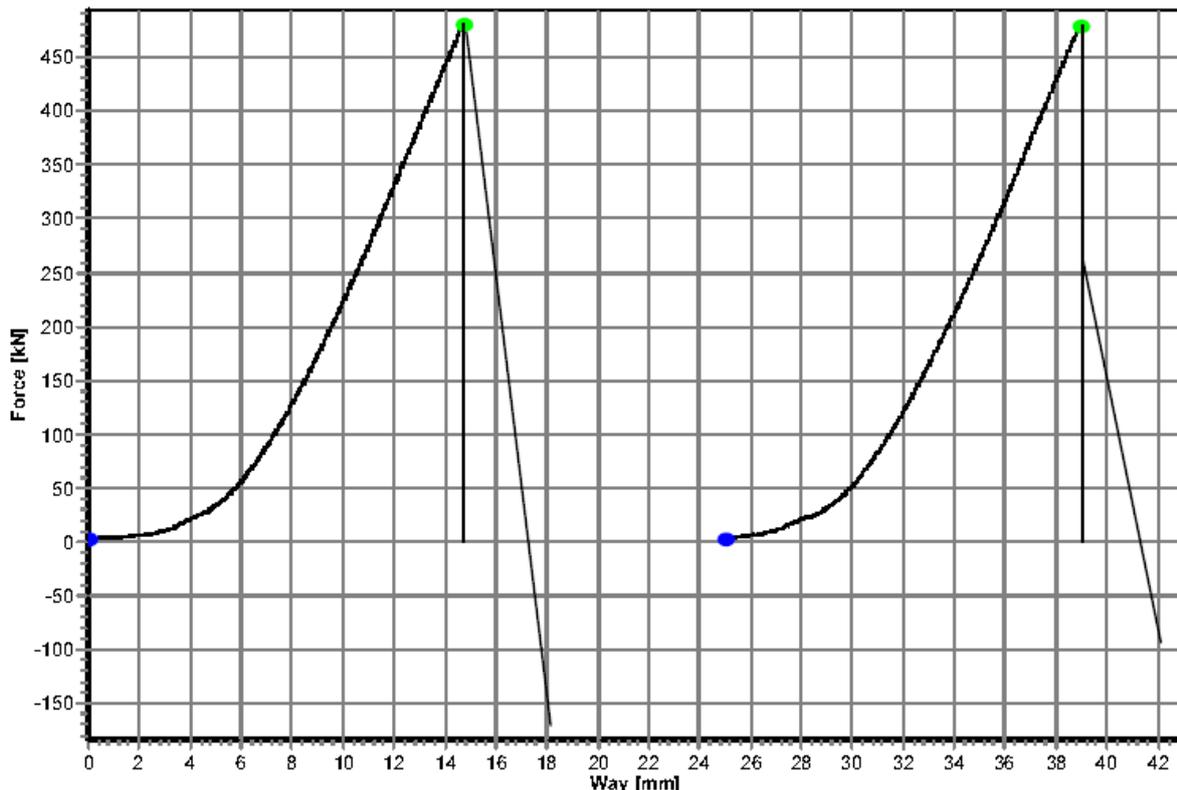


Abbildung 108: Kraft-Verlängerungsprotokoll des U1TE_18CrNiMo7-6

Hier wird die U1TE Kettengeometrie mit dem bewährten Werkstoff 18CrNiMo7-6 eingesetzt. Die Bruchkraft beträgt 481kN (Zugfestigkeit=453MPa). Die Gesamtdehnung bei Bruch beträgt 1,7%. Aufgrund des geringeren Kohlenstoffgehaltes erreicht die Zugfestigkeit nicht so hohe Werte, wie beim 30CrNiMo8. Alle Werte sind in der Toleranz und die Sicherheiten wurden auch eingehalten, somit können diese Versuchskörper, aus dieser Charge, für die Verschleißprüfung eingesetzt werden. Die Einsatzhärteschicht entspricht jener der Rundstahlkette aus dem 18CrNiMo7-6.

5.3.2.5 Gegenüberstellung der Zugversuche

Aus den Zugversuchen der verschiedenen Prüfkörper kann man erkennen, dass die Zugfestigkeiten unterschiedlich sind. Für das Versagen der Kette ist Großteils das Gefüge der entscheidende Parameter. Aufgrund dessen, also welche Legierungselemente enthalten sind, ergibt sich der elastische Dehnungsanteil und wann es zu plastifizieren beginnt (irreparable Schädigung des Bauteils). Eine hohe Plastifizierung bedeutet, dass die Dehnung bis zum Bruch größer sein wird (duktiler Bruch), als wenn die elastische Dehnung (Streckgrenze) größer ist (Sprödbbruch). Für eine Kette ist es wichtig, dass sie eine gewisse plastische Dehnung aufweist, da ansonsten bei Überbelastungen die Kettenglieder spröde brechen können (bei Becherwerken ändern sich ständig die Belastungen für die Kette). Andererseits braucht man eine hohe Härte (weniger Duktil), damit sich das Verschleißverhalten verbessert. Bauteile versagen häufig durch aus Überlasten und Spannungsspitzen entstandene Mikrorisse, welche sich zu Makrorissen aufsummieren, bis schlussendlich der Gewaltbruch eintritt. Jede Oberfläche besitzt Welligkeiten, Rauheiten, oder ähnliches, all diese Dinge sind Mikrokerben. An diesen Mikrokerben kommt es zu diesen Spannungsspitzen, weil sich dort die Krafftflusslinien verdichten. Wenn man sich für diese Rissphänomene genauer interessiert, sollte man sich mit der sogenannten Bruchmechanik befassen, für die Zeit bis zur Rissinitiierung benötigt man die Betriebsfestigkeit als Literatur. Bei Zugversuche handelt es sich um Kurzzeitversuche, die Überlast wird stetig erhöht bis das Versagen des Prüfkörpers eintritt. Alle Prüfkörper sind Einsatzgehärtet, was für den Zugversuch aber keinen wichtigen Einfluss hat, sofern die Einsatzhärtetiefe nicht zu groß wird (hohe Kohlenstoffeindiffundierung -> hohe Sprödigkeit).

Wie in dieser Arbeit schon besprochen, sind hohe Zugfestigkeiten auch ein Indiz für höhere Härten gegenüber geringeren Zugfestigkeiten. Höhere Härte besagt auch das die Verschleißrate geringer sein wird. Von den Zugversuchen gesehen muss man also davon ausgehen, dass der Verschleiß bei der neuesten Geometrie (U1TE), in Versuchsverschleißbereichen von 5% und darüber, geringer werden muss als zum Beispiel bei der geprüften Rundstahlkette.



Da man in dieser Arbeit den Verschleiß nicht so weit prüfen konnte, ist diese Zuhilfenahme der Zugversuche eine Untermauerung der Vermutung, dass die U1TE Kettengeometrie bei den Verschleißversuchen von der Qualität an sich am besten abschneiden wird. Ausgangslage für die neueren Geometrien waren die Spannungsspitzen der Rundstahlkette, aufgrund der höheren Flächenpressung in den Berührungspunkten der Kettenglieder. U1TA hat schon eine geringere Flächenpressung in den Berührungspunkten und die U1TE Geometrie ist schon sehr nahe an einer minimal erreichbaren Flächenpressung. Der Werkstoff spielt nicht so eine große Rolle, da die U1TA Geometrie, sowie die U1TE Geometrie aus dem gleichen Werkstoff bestehen. Der 30CrNiMo8 besitzt einen durchschnittlichen Kohlenstoffanteil von 0,3%, während der 18CrNiMo7-6 einen durchschnittlichen Kohlenstoffanteil von 0,18% besitzt. Kohlenstoffanstieg bedeutet, dass die Legierung spröder, aber auch härter wird. Deswegen macht es auch hier Sinn, dass bei U1TE und U1TA die Zugfestigkeit und Streckgrenze höher sind, während die Dehnung bei der Rundstahlkette am besten abschneidet. Trotzdem soll man es mit dem Kohlenstoff nicht übertreiben, da die Überlasten nicht mehr so hoch und nicht mehr so häufig auftreten dürfen, ansonsten könnte der schlagartige Sprödbruch eintreten, was zu einem Ausfall der gesamten Kette führen würde. Die Maschine wäre bis zur Reparatur nicht mehr Einsatzfähig, dies kann hohe Kosten bedeuten. Da ist es geschickter, besser etwas mehr Verschleiß zu riskieren und die Längung immer wieder zu überprüfen. Wenn ein kritischer Wert überschritten wird, kann man die Kette gezielt zu einem bestimmten Termin austauschen. Kohlenstoff ist auch bei der Verschweißung ein wichtiger Parameter, je höher der Kohlenstoffgehalt, desto schlechter wird die Schweißnahtqualität. Um Zugversuche vergleichen zu können, ist es entscheidend, dass alle Glieder die geprüft wurden, den gleichen Durchmesser haben. Je höher der Durchmesser, desto höher ist auch die zu erwartende Zugfestigkeit, weil wesentlich mehr Material vorhanden ist und dadurch die Zugkraft deutlich ansteigen muss, um die Kette zu zerreißen. Auch die Einsatzhärtetiefen waren bei allen Versuchskörpern in der Norm. Man geht bei der Einsatzhärtetiefe von 10% des Nenndurchmessers, der Kettenglieder, aus.



Die Geometrie wird nicht so einen großen Einfluss auf die Zugversuche gehabt haben, da der Nenndurchmesser, trotz der komplexeren Geometrie bei den U1TB und U1TE Geometrien, erhalten blieb. Die neueren Geometrien wurden entwickelt um den Verschleiß zu verringern, auf bruchmechanische Erscheinungen haben sie keine große Wirkung.

6 Schlussfolgerung, Zusammenfassung und Ausblick

Das Thema „Verschleiß“ stellt für Ingenieure immer eine gewaltige Herausforderung dar. Egal welchen Verschleißmechanismus die Maschine beziehungsweise das Maschinenelement ausgesetzt ist, diese Verschleißprozesse fügen der Volkswirtschaft große Schäden zu. Solche Schäden treten in großem Umfang bei der Gewinnung, Förderung und Verarbeitung von Rohstoffen auf. Eine Verminderung von Verschleiß in einer technischen Anlage kann nur unter Berücksichtigung aller am Verschleißvorgang beteiligter Elemente und deren Wechselwirkung erfolgen, da der Verschleiß eine Systemgröße ist.

Neben konstruktions-, verfahrens- und betriebstechnischen Maßnahmen, bietet die Weiterentwicklung der herkömmlichen Werkstoffe und die optimale Anpassung an den jeweiligen Einsatzfall ein erhebliches Potential zur systematischen Senkung der durch Verschleiß entstehenden Kosten.

In der vorliegenden Arbeit, wurden sowohl theoretische, als auch praktische Versuche unternommen, um den Verschleiß von Ketten zu minimieren. Die Werkstoffe, Geometrie und Oberflächenbehandlungsverfahren wurden so ausgewählt, dass man eine optimale Härte des Maschinenelementes besitzt und diese Härte durch Abmindern der Flächenpressung so lange wie möglich erhalten bleibt (geometrische Optimierung). Zum Einsatz gekommen sind verschiedene Vergütungsstähle, mit unterschiedlicher Geometrie an den Berührungspunkten. All diese Legierungen stammten aus industrieller Produktion, bei der praktischen Versuchsreihe wurden alle Legierungen, innerhalb der Toleranz, einsatzgehärtet.

In den theoretischen Überlegungen wurde versucht, wie man eine Kette aufgrund werkstofflicher und oberflächenbasierender Veränderung, den Verschleißfortschritt mindern kann. Die Grundidee dahinter war der theoretische Versuch, Ketten hinsichtlich Werkstoff und Oberflächenhärtung, auf Basis von Machbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Verschleißoptimierung zu erstellen. Man hat Überlegungen angestellt, Legierungen mit einem hohen Kohlenstoffgehalt ($\leq 0,9\%$) zu vergüten und anschließend noch die Oberfläche zu härten.

Diese Werkstoffe hätten eine hohe Grundhärte und eine noch höhere Oberflächenhärte, die einzige Gefahr hierbei ist, dass diese Ketten spröde sind, bei Überlast können diese leicht Versagen. Die beste Idee wurde dann im praktischen Versuch dieser Arbeit geprüft, wobei dort auch noch geometrische Aspekte eine Rolle spielten.

Im praktischen Teil ist die Hauptfrage, werden die Optimierungen der Kette laut Literatur, FEM-Daten und praktischer Erfahrung, Wirkung zeigen. Die Prüfkörper wurden einer Temperaturmessung und einer Schwenktribometrie unterzogen. Auch Zugversuchsdaten wurden zur verbesserten Analyse herangezogen. Die Temperaturmessung gibt Einblicke, ob sich die Kette in der Realität so stark erhitzen wird, dass es zu einem hohen Anstieg des Verschleißes kommen kann. Die wichtigste Untersuchung war die Verschleißmessung auf dem Schwenktribometer. Alle Proben wurden dort, je nachdem ob es sich um einen Kurzzeit- oder Langzeitversuch gehandelt hat, zwei Wochen oder Länger, dem Verschleiß ausgesetzt. Die Grundparameter, wie Anpresskraft, Abwinkelung und Hubgeschwindigkeit, wurden immer gleich eingestellt, damit man die Proben effektiv miteinander vergleichen kann. Als Referenz verwendete man eine erprobte Kette aus einem Vergütungsstahl, eine Rundstahlkette. Die neuen Ketten bestehen auch aus einem Vergütungsstahl, doch die Legierung ist anders und auch die Geometrie wurde modifiziert. Auch die einsatzgehärtete Schicht, ist bei den neueren Kettenproben geringer.

Bei der Temperaturmessung erwärmte sich die Rundstahlkette, bei derselben Hubgeschwindigkeit, am geringsten. Grund dafür ist ihre gleichförmige Geometrie, diese leitet die Wärme besser aus den Berührungspunkten der Kettenglieder ab. Die neueren Geometrien sind weit komplexer, wodurch es zu Hitzestauungen kommt. Trotzdem werden bei diesen Versuchen keine Temperaturbereiche erreicht, in welche man mechanische oder metallurgische Phänomene erwarten kann, wodurch die Kette enorm geschädigt wird. Dennoch kann die Gefahr bestehen, dass wenn die Geschwindigkeit erhöht wird, oder auch die Anpresskraft (Flächenpressung), man in Temperaturbereiche kommt, wo der Verschleiß stark ansteigen kann. Ob die Legierung für einen Temperaturanstieg

in dieser Arbeit in Frage kommt, kann bezweifelt werden. Die Legierungen unterscheiden sich hauptsächlich nur im Kohlenstoffbereich. Haupteinflüsse für die Erwärmung sind Flächenpressung, Geometrie und Umgebungsbedingungen. Nach ungefähr einer Stunde stellt sich eine Konstanz bei allen Temperaturmessungen ein.

Die Zugversuche der Kettenproben dienen als Untermauerung für die Härteeigenschaften der Kette. Die neueren Ketten, welche der Rundstahlkette gegenübergestellt werden, besitzen fast doppelt so viel Kohlenstoff. Aus den Zugversuchen bestätigt sich dies, durch höhere Zugfestigkeitswerte und einer Abnahme der Bruchdehnung. Dies sind genau die Eigenschaften, die der Kohlenstoff ändert. Das Gefüge wird spröder, aber dafür verschleißbeständiger. Es ist wichtig genau so viel Kohlenstoff zu verwenden, dass der Schutz vor Sprödbruch, durch Überlast, gewahrt wird und doch die maximal erreichbare Härte des Kerns (Grundhärte) eingestellt wird. Die U1TC-U1TE Geometrie aus dem 30CrNiMo8 schnitt am besten ab was die Zugfestigkeit anging, zweite war die U1TA-U1TB Geometrie aus dem 30CrNiMo8, weiter hinten findet man noch die U1TC-U1TE Geometrie aus 18CrNiMo7-6 und die Rundstahlkette aus dem 18CrNiMo7-6. Grund für diesen Ausgang der Zugversuche ist der Kohlenstoffanteil. Höherer Kohlenstoffanteil bedeutet höhere Zugfestigkeit. Auch die jeweiligen Geometrien können die Zugfestigkeit beeinflussen. Geometriemodifikationen können den Kraftfluss so leiten, dass der Werkstoff gleichmäßiger belastet wird und nicht punktuell angegriffen wird. Die Duktilität des Werkstoffes kann dann die Probenzerstörung zusätzlich hinauszögern.

Beim Verschleiß im Kurzzeitbereich, schneidet die Rundstahlkette am besten ab. Für die verschiedenen „Hero“-Geometrien ist dieser geprüfte Bereich noch zu gering, als das man dort schon deren Potential nutzen könnte. Obwohl die Rundstahlkette zu diesem Verschleißzeitpunkt vorne ist, erkennt man, dass das Außenglied und das Innenglied unterschiedlich stark verschleifen, obwohl Geometrie, Werkstoff und Oberflächenbehandlung ident sind. Grund für diese Entwicklung könnte der adhäsive Verschleiß sein.

Warum die Rundstahlkette, im gesamten gesehen, zu diesem Zeitpunkt besser abschneidet, als die „Hero“-Kette, hat mehrere Gründe. Die Geometrie der Rundstahlkette besitzt keinen Schmiedegrat und ist homogen und gleichmäßig. Auch die Oberflächenhärte ist bei der Rundstahlkette deutlich höher, als die der „Hero“-Kette, diese Tatsache sorgt auch dafür, dass der Verschleiß geringer ausfällt (höhere Härte = geringerer Verschleiß). Erst nach einiger Zeit, werden die Geometrie der „Hero“-Kette und auch die höhere Grundhärte dieser, den Gesamtverschleiß unter jenen der Rundstahlkette bewegen. Grund für diese Entwicklung ist zum einen der höhere Kohlenstoffgehalt in der Legierung der „Hero“-Kette und zum anderen die modifizierte Geometrie, wodurch auch die Flächenpressung gesenkt wird. Ein kleiner Verschleißanteil kann noch der Temperatur zugeschrieben werden, diese ist bei den „Hero“-Ketten, aufgrund der komplexeren Geometrie, ein wenig höher.

Im Langzeitversuch wurden die Rundstahlkette und die Hero aus dem gleichen Werkstoff (18CrNiMo7-6) hergestellt. Es sind alle Parameter ident bis auf die Geometrie. Bis zu diesem Zeitpunkt des Versuches konnte die Hero-Kette leider keinen Vorteil gegenüber der Rundstahlkette, allein aufgrund der Geometrie, zeigen. Es kann vermutet werden, dass aufgrund der geringeren Beweglichkeit der Hero-Kette, diese zu Beginn einen höheren Verschleiß besitzt. Der Schmiedegrat selbst spielt dabei keine besondere Rolle. Erst im Laufe der Zeit kann man davon ausgehen, dass die Hero-Kette, aufgrund ihrer geringeren Flächenpressung, eine deutlichere Verschleißminderung gegenüber der Rundstahlkette erhalten kann.

Diese Arbeit sollte den zweiten wichtigen Parameter, neben der Bruchkraft der Kette, betrachten, den Verschleiß. Man kann durch Verringerung der Flächenpressung deutliche Verbesserungen im Hinblick auf den Verschleiß erzielen, dass ist aus der Literatur schon bekannt. Auch der Werkstoff kann das Verschleißverhalten deutlich verändern, sowie auch die Oberflächenbehandlung. In dieser Arbeit ist man auf diese Parameter eingegangen und hat sich angesehen, wie sich der Verschleiß verhält wenn man eine Referenzkette (Rundstahlkette-18CrNiMo7-6) mit anderen Ketten vergleicht.

Die Ergebnisse sind sehr verwachsen, aufgrund von fehlender Erfahrung auf diesem Gebiet wurden gewisse Probleme erst im Nachhinein entdeckt. Trotzdem erkennt man Tendenzen, durch Graphen dargestellt, die zeigen, dass die neueren Geometrien und Werkstoffe Wirkung zeigen. Für die weiteren Versuche wird empfohlen die Versuchszeiten deutlich anzuheben. Die Referenzkette sollte mindestens acht Wochen lang geprüft werden, da man bei solchen Prüfdauern (abhängig von der Prüfgeschwindigkeit) schon in hohe Verschleißbereiche kommt. Die darauf bezogenen Ketten sollte man solange prüfen, bis man deutliche Tendenzen erkennt. Die nächste Verbesserung gegenüber dieser Versuchsreihe wäre es, die Prüfkörper durchgehend eingespannt zu lassen, dadurch hat man einen sehr realistischen betrieblichen Verschleiß. Für weitere Versuche wird empfohlen, die U1TC-U1TE-Kettenglieder aus dem 30CrNiMo8, mit der Rundstahlkette zu vergleichen, aber mit den neuen empfohlenen Prüfbedingungen. Hier sind sicher Vorteile aufgrund der neuen Geometrie und des neuen Werkstoffes zu erkennen. Die Oberflächenbehandlung sollte bei beiden Prüfkörpern gleich sein. Als nächster Versuchsschritt sollte auf den adhäsiven Verschleiß eingegangen werden. Es wird empfohlen ein Glied aus der U1TC-Geometrie und eines aus der U1TE-Geometrie herzustellen. Das U1TE-Glied sollte aus dem Werkstoff 30CrNiMo8 hergestellt werden und das andere Glied aus dem 18CrNiMo7-6. Die Oberflächenbehandlung sollte einmal ident sein und einmal unterschiedlich. Hier kann erwartet werden, dass die Performance gut sein wird, da der adhäsive Verschleiß bei Ketten zuvor nie beachtet worden ist.

Letztendlich bleibt noch zu sagen, dass die Versuchseinrichtungen der Firma Pewag von bester Qualität sind. Diese Firma ist auch in der Lage komplexeste Geometrien herzustellen und auch im Weiteren mit einer exzellenten Oberflächenhärte auszustatten (Oberflächenbehandlung). In dieser Firma ist es auch möglich Ketten aus Werkstoffen mit einem hohen Kohlenstoffgehalt herzustellen (höhere Verschleißbeständigkeit) und trotzdem zu verschweißen. Die erzielten Bruchkräfte sind mehr als gut und die Zugversuche zeigen, dass die Ketten nie an der Schweißnaht versagen, ein Zeichen für beste Schweißnahtqualität. Diese Ketten sind sehr empfehlenswert.

7 Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Gestaltabweichungen der Oberfläche..... | 6 |
| Abbildung 2: Tribologisches System..... | 8 |
| Abbildung 3: Verschleißmechanismen | 12 |
| Abbildung 4: Beispiele zu den Verschleißmechanismen | 12 |
| Abbildung 5: Gleitverschleiß | 14 |
| Abbildung 6: Wälzverschleiß | 14 |
| Abbildung 7: Verschleiß durch Fretting..... | 15 |
| Abbildung 8: Erosionsverschleiß | 15 |
| Abbildung 9: Kavitationsverschleiß..... | 15 |
| Abbildung 10: Zusammenhang: Verschleißart und Verschleißmechanismus..... | 16 |
| Abbildung 11: Reibungskoeffizient μ | 17 |
| Abbildung 12: Adhäsion..... | 18 |
| Abbildung 13: Abrasion | 18 |
| Abbildung 14: Tribochemische Reaktion | 18 |
| Abbildung 15: Oberflächenzerüttung | 18 |
| Abbildung 16: Verschleißminderung..... | 19 |
| Abbildung 17: Verschleißbeständige Stähle bzw. Stahlgussarten | 26 |
| Abbildung 18: Schmierstoffe..... | 26 |
| Abbildung 19: Schwerpunkte der Oberflächentechnik..... | 28 |
| Abbildung 20: Verfahrensauswahlparameter..... | 29 |
| Abbildung 21: Entstehung der Druckeigenstressungen..... | 31 |
| Abbildung 22: einseitig kugelgestrahlte Oberfläche; Spannungsverteilung | 31 |
| Abbildung 23: Induktionshärten | 33 |
| Abbildung 24: Flammhärten..... | 35 |
| Abbildung 25: Schema zum Laserstrahlhärten | 37 |
| Abbildung 26: Vor- und Nachteile der thermischen Verfahren im Vergleich | 38 |
| Abbildung 27: Kohlenstoffanreicherung | 40 |
| Abbildung 28: Härtevarianten, Einsatzhärten | 42 |
| Abbildung 29: Einsatzhärtevorgang..... | 43 |
| Abbildung 30: Nitrocarburisiertes perlitisch-ferritisches Gefüge | 45 |
| Abbildung 31: Thermochemische Diffusionsbehandlungen | 48 |



| | |
|---|----|
| Abbildung 32: Schematik eines CVD-Systems..... | 53 |
| Abbildung 33: Thermische Spritzverfahren..... | 54 |
| Abbildung 34: Prinzip des thermischen Spritzens..... | 55 |
| Abbildung 35: Einflussfaktoren beim thermischen Spritzen | 55 |
| Abbildung 36: Verschleißerscheinungen einer Rundstahlkette..... | 59 |
| Abbildung 37: Oberfläche eines 20CrMo5 nach Einsatzhärtung und chemischer Vernickelung..... | 62 |
| Abbildung 38: induktive Härtung einer Rundstahlkette | 65 |
| Abbildung 39: Physikalische Eigenschaften des 30CrNiMo8..... | 72 |
| Abbildung 40: Mechanische Eigenschaften des 30CrNiMo8 | 72 |
| Abbildung 41: Physikalische Eigenschaften des 18CrNiMo7-6 | 73 |
| Abbildung 42: Mechanische Eigenschaften des 18CrNiMo7-6..... | 73 |
| Abbildung 43: Kostenvergleich der Oberflächenverfestigungsverfahren | 75 |
| Abbildung 44: Oberflächentechnologien: Schichtdicke zu möglicher Härte | 76 |
| Abbildung 45: Härtevergleiche, Thermochemische Verfahren vs. Vergüten | 77 |
| Abbildung 46: Zugprüfmaschine | 80 |
| Abbildung 47: Arten des Spannungs-Dehnungs-Diagrammes | 80 |
| Abbildung 48: Rund -und Flachproben | 81 |
| Abbildung 49: Verformungsbereiche im Spannungs-Dehnungs-Diagramm | 82 |
| Abbildung 50: Zugversuchsproben, Brucharten..... | 83 |
| Abbildung 51: Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit ausgeprägter Streckgrenze.... | 84 |
| Abbildung 52: Spannungs-Dehnungs-Diagramm ohne ausgeprägte Streckgrenze.. | 85 |
| Abbildung 53: Verschleißsimulation..... | 87 |
| Abbildung 54: moderner Verschleißprüfstand (Tribometer)..... | 87 |
| Abbildung 55: Abrasivprüfstände: rechts: translatorisch, links: rotatorisch | 88 |
| Abbildung 56: Lineartribometer an der MU-Leoben..... | 89 |
| Abbildung 57: Lineartribometer 2 an der MU-Leoben..... | 90 |
| Abbildung 58: Aufnehmer und Prüfkörper für Lineartribometer 2 | 91 |
| Abbildung 59: Schwenktribometer der Fa.Pewag..... | 93 |
| Abbildung 60: Einbau des Prüfkörpers in den Verschleißprüfstand..... | 94 |
| Abbildung 61: Behälter für abrasives Medium | 95 |
| Abbildung 62: Steuerstand des Schwenktribometers | 96 |



| | |
|--|-----|
| Abbildung 63: Prüfkörper für Schwenktribometer der Fa. Pewag | 97 |
| Abbildung 64: Parameter setzen an Steuerkonsole..... | 99 |
| Abbildung 65: Bohrung für Temperaturmessfühler | 101 |
| Abbildung 66: Temperaturmessfühler..... | 102 |
| Abbildung 67: Fertige Probe mit Temperaturmessfühler | 102 |
| Abbildung 68: Probe eingebaut in Prüfstand | 103 |
| Abbildung 69: Dewetron | 103 |
| Abbildung 70: Fertiger Versuchsaufbau | 104 |
| Abbildung 71: Verschleißprotokoll | 105 |
| Abbildung 72: Verschleißmessung | 106 |
| Abbildung 73: Kettenzugprüfmaschine bei der Fa. Pewag | 107 |
| Abbildung 74: Schutzabdeckung geöffnet | 108 |
| Abbildung 75: Eingehängter Prüfkörper..... | 109 |
| Abbildung 76: Schutzabdeckung geschlossen | 109 |
| Abbildung 77: Computer der Kettenzugprüfmaschine zur Datenerfassung | 110 |
| Abbildung 78: Zerstörter Prüfkörper | 111 |
| Abbildung 79: Hydraulikeinrichtung und Steuerungseinheit | 111 |
| Abbildung 80: Abwinkelung α | 112 |
| Abbildung 81: Temperaturmessung der U1TA-U1TB Geometrie | 115 |
| Abbildung 82: U1TA-U1TB | 115 |
| Abbildung 83: Temperaturmessung der U1TE-U1TC Geometrie | 116 |
| Abbildung 84: U1TE-U1TC..... | 116 |
| Abbildung 85: Temperaturmessung Rundstahlkette..... | 117 |
| Abbildung 86: Rundstahlkette aus 18CrNiMo7-6..... | 117 |
| Abbildung 87: Thermobild der U1TE-Geometrie bei 14% Geschwindigkeit..... | 118 |
| Abbildung 88: Übersicht der Temperaturmessungen bei verschiedenen Hubgeschwindigkeiten..... | 119 |
| Abbildung 89: Verschleißmessung | 123 |
| Abbildung 90: Fertige Verschleißprüfung der alten Geometrie | 125 |
| Abbildung 91: Verschleißener Prüfkörper der neuen Geometrie | 126 |
| Abbildung 92: Verschleißprobe der Rundstahlkette..... | 127 |



| | |
|---|-----|
| Abbildung 93: geprüfte U1TE-U1TC-Geometrie, Hubgeschwindigkeit 14% | 130 |
| Abbildung 94: Verschleiß bezogen auf Rundstahlkette | 131 |
| Abbildung 95: Schmiedegeometrien-Trend vs. Rundstahlkette | 132 |
| Abbildung 96: Verschleißübersichten Vollglieder und Halbglieder..... | 134 |
| Abbildung 97: Übersicht des Verschleißes der Kettenglieder zueinander | 137 |
| Abbildung 98: Kettenoberfläche..... | 138 |
| Abbildung 99: Härteverläufe | 139 |
| Abbildung 100: Langzeitverschleißprüfung..... | 140 |
| Abbildung 101: Verschleiß bezogen auf Rundstahlkette | 140 |
| Abbildung 102: Verschleiß Voll- und Halbglieder..... | 142 |
| Abbildung 103: Verschleißgeschwindigkeit..... | 143 |
| Abbildung 104: Bruchbild nach einem Kettenzugversuch..... | 145 |
| Abbildung 105: Kraft-Verlängerungsprotokoll der Rundstahlkette | 146 |
| Abbildung 106: Kraft-Verlängerungsprotokoll des U1TA_30CrNiMo8 | 147 |
| Abbildung 107: Kraft-Verlängerungsprotokoll des U1TE_30CrNiMo8 | 148 |
| Abbildung 108: Kraft-Verlängerungsprotokoll des U1TE_18CrNiMo7-6 | 149 |

8 Abbildungsquellen

Abbildung 1:

Quelle: <http://darwin.bth.rwth-aachen.de/opus/volltexte/2002/341/pdf/html/img4.gif>

Abbildung 2:

Quelle: http://www.expertverlag.de/einblicke/9783816928300_Leseprobe.pdf

Abbildung 3, Abbildung 4, Abbildung 5, Abbildung 6, Abbildung 7, Abbildung 8,

Abbildung 9, Abbildung 10:

Quelle: https://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_maschinenwesen/ifww/professuren/wpc/reibung_und_verschleiss

Abbildung 11:

Quelle: <http://www.igus.at/contentData/wpck/pdf/global/Reibung%20Verschleiss%20und%20PV-Wert.pdf>

Abbildung 12, Abbildung 13, Abbildung 14, Abbildung 15:

Quelle: https://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_maschinenwesen/if/lot/studium/lehrveranstaltungen/download%20duennschichttechnik/vl5_verschleisschutzschichten

Abbildung 16, Abbildung 17, Abbildung 18:

Quelle: https://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_maschinenwesen/ifww/professuren/wpc/reibung_und_verschleiss

Abbildung 19, Abbildung 20:

Quelle: http://www.tu-ilmenau.de/fileadmin/media/wt_pot/Lehre/PhV-BA-WSW-%20Handout.pdf



Abbildung 21:

Quelle: Beschreibung der Vorgänge beim Ultraschallkugelstrahlen unter Berücksichtigung der Strahlintensität und der Kugelbewegungen bei Parameteränderungen; Diplom-Ingenieur Philipp Thümmeler; Fakultät für Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus

Abbildung 22:

Quelle: <http://cwst.com/extend/premium/PDF/Greenbook/German/DeutscheVersion.pdf>

Abbildung 23:

Quelle: http://werkstoffwoche.de/fileadmin/user_upload/20150916_Heni_ECOROLL.pdf

Abbildung 24:

Quelle: <https://metallwarriors.wordpress.com/tag/induktionsharten/>

Abbildung 25:

Quelle: <http://www.erlas.de/de/auftragsfertigung/laserstrahlhaerten.html>

Abbildung 26:

Quelle: <http://www.eagle-group.eu/de/laserhartung>

Abbildung 27:

Quelle: <http://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/10/MB-452-%20Einsatzhaerten.pdf>

Abbildung 28,29:

Quelle: <https://www.studyblue.com/notes/n/technische-wrmebehandlung-hrten/deck/11562027>

Abbildung 30:

Quelle: <http://www.nitrocarburieren.de/>

Abbildung 32,33,34:

Quelle: <http://www.forum-thermisches-spritzen.de/allgemeines/was-ist-thermisches-spritzen/p30-1-grundlagen/>

Abbildung 35:

Quelle: Tribologie – Reibung, Verschleiß, Schmierung; Band 9; Dokumentation zum Forschungs- und Entwicklungsprogramm des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (BMFT); W. Bunk, J. Hansen, H. Haag

Abbildung 36:

Quelle: Beitrag zur Entwicklung von neuen Traglaschenketten in der Fördertechnik; Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz; Dipl.-Ing. Frank Friedrich

Abbildung 37:

Quelle: <http://images.vogel.de/vogelonline/bdb/610400/610414/26.jpg>

Abbildung 38,39:

Quelle: http://www.thyssenkrupp.at/files/bs/Werkstoffdatenblaetter/1.6580_de.pdf

Abbildung 40,41:

Quelle: http://www.thyssenkrupp.at/files/bs/Werkstoffdatenblaetter/1.6587_de.pdf

Abbildung 42,43,44:

Quelle: http://www.gerster.ch/userfiles/downloads/1419345850016687/Borieren_d_18122014.pdf

Abbildung 45:

Quelle: de.wikipedia.org/wiki/Zugversuch#/media/File:Inspekt_desk_50kN_IMGP8563.jpg

Abbildung 46:

Quelle: tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/ifww/biomaterialien/ressourcen/dateien/lehre/w_w_praktika/zug?lang=de



Abbildung 47:

Quelle: <http://www.fiedler-oe.de/de/applications/series/test.html>

Abbildung 48:

Quelle: tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/ifww/biomaterialien/ressourcen/dateien/lehre/www_praktika/zug?lang=de

Abbildung 49:

Quelle: <http://wewi.matthiasjasch.de/attachments/ZV.pdf>

Abbildung 50,51:

Quelle: de.wikipedia.org/wiki/Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Abbildung 52:

Quelle: <http://www.k-magazin.de/fileserver/henrich/files/2205.pdf>

Abbildung 53:

Quelle: www.tuhh.de/amp/forschung/tribologie/reibungs-und-verschleisspruefstand.html

Abbildung 54:

Quelle: www.tu-chemnitz.de/mb/lvw/forschung/ta52_Millertest.php

Abbildung 56 bis einschließlich 105:

Quelle: Privatarchiv von Kogler Gabriel

9 Quellenverzeichnis

- [1] Bowden, Tabor: Reibung und Schmierung fester Körper, Springer-Verlag, Berlin 1959
- [2] <http://www.rime.de/wiki/verschleiss/> (Stand: 28.02.2016)
- [3] <http://rauschert.com/de/produkte/technische-keramik/keramische-beschichtungen.html> (Stand: 28.02.2016)
- [4] Wilfried Bartz: Einführung in die Tribologie und Schmierungstechnik. expert Verlag, 2010, ISBN 978-3-8169-2830-0
- [5] Thomas Lampke: Gestaltung technischer Oberflächen mit funktionalen Aufgaben, Band 30
- [6] Prof. Dr. Martina Zimmermann: Vorlesung Schadenanalyse: Reibung und Verschleiß; Powerpoint-Präsentation; TU Dresden (Stand: 28.02.2016)
- [7] <http://www.igus.at/contentData/wpck/pdf/global/Reibung%20Verschleiss%200und%20PV-Wert.pdf> (Stand: 28.02.2016)
- [8] Johannes Wilhelm Raedt: Grundlagen für das schmiermittelreduzierte Tribosystem bei der Kaltumformung des Einsatzstahles 16MnCr5; Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen



- [9] Technische Information: Verschleißfeste Stähle; Fa. Seeberger (Internetquelle:http://seeberger.net/_assets/pdf/03_Verschleissfeste_Staehle.pdf (Stand: 29.02.2016))
- [10] http://www.bs.wiki.de/mediawiki/images/Tribologie_Pr%C3%A4sentation.pdf (Stand: 01.03.2016)
- [11] http://www.euromat.de/wcms/ftp//e/euromat.de/uploads/2013_04_10_vortrag_wuerzburg_130410-11.pdf (Stand: 05.03.2016)
- [12] TECHNISCHE UNIVERSITÄT ILMENAU; Fachgebiet: Plasma- und Oberflächentechnik; Dr.-Ing. Birger Dzur; Grundlagen der Oberflächentechnik - Physikalische Verfahren; Internetquelle: http://www.tu-ilmenau.de/fileadmin/media/wt_pot/Lehre/PhV-BA-WSW-Handout.pdf (Stand: 05.03.2016)
- [13] Verbesserung des Ermüdungsverhaltens von γ -TiAl-Legierungen durch mechanische Oberflächenbehandlung; Von der Fakultät Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus; Diplom-Ingenieurin Maria Glavatskikh
- [14] Gefüge hartstoffhaltiger Fe-Basis Werkstoffe; Lehrstuhl Werkstofftechnik, Institut für Werkstoffe, Ruhr-Universität Bochum; Werner Theisen
- [15] Beschreibung des Eigenspannungsabbaus in kugelgestrahltem Inconel 718 bei thermischer, quasistatischer und zyklischer Beanspruchung; Fakultät für Maschinenbau des Karlsruher Instituts für Technologie; Dipl.-Ing. Jürgen Hoffmeister



- [16] ECOROLL AG; Internetquelle; <http://www.ecoroll.de/verfahren/festwalzen-grundlagen-des-festwalzens.html> (stand: 08.03.2016)
- [17] Zur Ermüdungsfestigkeit von Schweißkonstruktionen aus höherfesten Baustählen bei Anwendung von UIT-Nachbehandlung; Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität Stuttgart; André Dürr
- [18] Handbuch Wärmebehandeln und Beschichten; Günter Spur, Hans-Werner Zoch; ISBN:978-3-446-42779-2, Carl-Hanser Verlag, München 2015
- [19] Härtetechnik Hagen GmbH, Internetquelle: <http://www.haertetechnik-hagen.de/induktionshaerten> (Stand 11.03.2016)
- [20] Induktionshärten Die Wärmebehandlung mit Zukunft; ALDUCTO Qualitäts-Induktionshärtereie; Internetquelle: <http://www.alducto.ch/projekt/downloads/firmenbroschuere.pdf> (Stand: 11.03.2016)
- [21] Hanomag Lohnhärtereie Unternehmensgruppe; Internetquelle: <http://www.haertecenter.de/index.php?id=19> (Stand:11.03.2016)
- [22] The Linde Group; Internetquelle: http://www.linde-gas.at/de/anwendungen/schweissen_schneiden/autogen/flammhaerten/index.html (Stand: 11.03.2016)



- [23] Wärmebehandlung von Stahl – Randschichthärten; Wirtschaftsvereinigung Stahl; Stahl-Information-Zentrum; Internetquelle:
<http://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/10/MB236WaermebehandlungvonStahlRandschichtharten.pdf> (Stand 11.03.2016)
- [24] ALOtec Dresden GmbH;
Internetquelle:<http://www.alotec.de/de/technologie/laserstrahlhaerten>
(Stand 11.03.2016)
- [25] eifeler Lasertechnik GmbH; Internetquelle:
<http://www.eifeler-lasertechnik.de/cms/laserstrahlhaerten.html>
(Stand:11.03.2016)
- [26] Industrieverband Härtetechnik;
Internetquelle: <http://www.haertetechnik.org/index.php?cid=129&sid=4&m=>
(Stand:11.03.2016)
- [27] REES Zerspanungstechnik; Internetquelle: http://home.josefrees.de/ablage/med_00000131_1246004314_InternetEinsatzhaerten.pdf
(Stand 12.03.2016)
- [28] Härterei Haferbier GmbH; Internetquelle:
<http://www.haertere-haferbier.de/waermebehandlung/einsatzhaerten.php>
(Stand: 12.03.2016)



- [29] Merkblatt 452 „Einsatzhärten“ Ausgabe 2008 ISSN 0175-2006;
Wirtschaftsvereinigung Stahl; Dr.-Ing. Dieter Liedtke; Internetquelle:
<http://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/10/MB-452-Einsatzhaerten.pdf> (Stand: 12.03.2016)
- [30] Thermochemische Verfahren I Heat Treatments; Einsatzhärten; Aalberts Industries Company; Internetquelle:
<http://www.h-st.nl/upload/file/Downloads/Leaflet%20Carboneren-Carbonitieren%20DU.pdf> (Stand: 12.03.2016)
- [31] Härterei Haferbier GmbH; Internetquelle:
<http://www.haererei-haferbier.de/waermebehandlung/nitrieren.php>
(Stand: 12.03.2016)
- [32] Nitriertechnik Waiblingen GmbH; Internetquelle:
<http://www.nitriertechnik.de/index.php?page=warumnitrieren&title=Waerum%20Nitrieren> (Stand:12.03.2016)
- [33] Thermochemische Verfahren I Heat Treatments; Aalberts Industries Company; Nitrieren-Nitrocarburieren Internetquelle:
<http://www.h-st.nl/upload/file/Downloads/Folder%20Nitieren-Nitrocarboneren%20DU.PDF> (Stand:12.03.2016)
- [34] Nitrieren und Nitrocarburieren; Thomas Meiners, Sascha Janning, Christian Bogenstahl, Andreas Frericks; Internetquelle:
http://frericks.biz/media/DIR_3901/Nitrieren%20und%20Nitrocarburieren%20Metallographie%20AF.pdf (Stand: 12.03.2016)



- [35] Skriptum zur Vorlesung Füge- und Oberflächentechnik; Ausgabe SS 2013; Univ.Prof. Dr. Bruno Buchmayr; Lehrstuhl für Umformtechnik am Department für Product Engineering; Montanuniversität Leoben
- [36] Bodycote; Internetquelle: <http://www.bodycote.com/de-DE/site-services/company-registration.aspx>
- [37] Bodycote; Internetquelle: <http://www.bodycote.com/de-DE/services/heat-treatment/case-hardening-with-subsequent-hardening-operation/boriding.aspx> (Stand: 12.03.2016)
- [38] Gerster Härterei; Internetquelle: http://www.gerster.ch/userfiles/downloads/1419345850016687/Borieren_d_18122014.pdf (Stand: 12.03.2016)
- [39] Chromin Maastricht BV; Internetquelle: <http://www.chromin.nl/DE/prozesse/borieren> (Stand: 12.03.2016)
- [40] TRUMPF GmbH + Co. KG (Holding); Internetquelle: <http://www.de.trumpf.com/de/metanavigation/footer/impressum.html> (Stand: 13.03.2016)
- [41] Plasma-Oberflächen-Service GmbH; PVD-Beschichtungen: Überblick und Anwendungen für die Messerindustrie; Internetquelle: <http://www.werkzeug.org/Portals/0/FWI-Symposium-Beschichtung-POS.pdf> (Stand: 13.03.2016)



- [42] ionbond The surface Engineers; Internetquelle:
<http://www.ionbond.com/de/technologie/pvd/> (Stand: 13.03.2016)
- [43] Diener electronic GmbH + Co. KG; Internetquelle:
http://www.plasma.de/de/plasma_wissenswertes/plasma_system_7.html
(Stand: 13.03.2016)
- [44] IHI Hauzer Techno Coating B.V.; Internetquelle:
<http://www.hauzertechnocoating.com/de/technik-erlautert/lichtbogen-verdampfung-/> (Stand: 13.03.2016)
- [45] Physik und Technologie Dünner Schichten; TU Wien; Internetquelle:
http://static.ifp.tuwien.ac.at/homepages/Personen/duenne_schichten/pdf/t_p_ds_kapitel2.pdf (Stand: 13.03.2016)
- [46] Universität Heidelberg; Beschichtungen; Internetquelle:
http://archiv.ub.uni-heidelberg.de/volltextserver/2101/6/Kapitel_03.pdf
(Stand: 13.03.2016)
- [47] Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH; Internetquelle:
<http://www.spektrum.de/lexikon/physik/chemische-gasphasenabscheidung/2341> (Stand: 13.03.2016)
- [48] CVD-Verfahren; Martin Stiftinger; TU Wien; Internetquelle:
<http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/strasser/node58.html> (Stand: 14.03.2016)



- [49] Thermisches Spritzen Verfahrenstechnik und Gase-Auswahl; Fa. Messer;
Internetquelle:
http://old.messergroup.com/de/Info_Download/Fachbroschueren/Schweissen_und_Schneiden/Thermisches_Spritzen.pdf (Stand: 14.03.2016)
- [50] Neue Methoden und Anwendungen des Thermischen Spritzens; Fakultät für Maschinenbau; TU Chemnitz; Dr.-Ing. Christian Rupprecht;
Internetquelle:
http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/10249/Habilitationsschrift_Christian_Rupprecht.pdf (Stand: 15.03.2016)
- [51] Fortgeschrittenenpraktikum Nichtmetalle II, Lehrstuhl für Pulvertechnologie von Glas und Keramik; UNIVERSITÄT DES SAARLANDES; Prof. Dr. Rolf Clasen; Internetquelle: http://www.uni-saarland.de/fak8/powdertech/lehre/handouts/praktikum/thermische_Spritzverfahren.pdf (Stand: 15.03.2016)
- [52] WAS IST THERMISCHES SPRITZEN; LINS PRAY – Gase und Know-how beim Thermischen Spritzen; Linde AG, Geschäftsbereich Linde Gas;
Internetquelle: http://www.gts-ev.com/html_d/ts-info.htm#Grundlagen
(Stand: 15.03.2016)
- [53] Collini Gesellschaft m.b.H.; Internetquelle:
<http://www.collini.eu/de/unternehmen/technologien/galvanisieren>
(Stand: 15.03.2016)
- [54] A. C. Galvanik GmbH & CO.KG; Internetquelle:
<http://www.acgalvanik.de/galvanik.html> (Stand: 15.03.2016)



- [55] Tribologie – Reibung, Verschleiß, Schmierung; Band 9; Dokumentation zum Forschungs- und Entwicklungsprogramm des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (BMFT); W. Bunk, J. Hansen, H. Haag
- [56] Einfluss von Legierungselementen; Fachbereich Maschinenbau; HOCHSCHULE BREMEN; Prof. Dr.-Ing. Uwe Reinert, Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Schubert; Internetquelle: http://www.hs-bremen.de/internet/hsb/struktur/mitarbeiter/schubert/lehrveranstaltungen/werk/materialien/118_zusatzinfos_einflu___legierungselemente.pdf
(Stand: 19.03.2016)
- [57] Werkstoffkunde Metall/ Eisen und Stahl/ Normen und Legierungen; Wikibooks; Internetquelle: https://de.wikibooks.org/wiki/Werkstoffkunde_Metall/_Eisen_und_Stahl/_Normen_und_Legierungen (Stand: 19.03.2016)
- [58] Stahl – Einfluss der Legierungselemente; Maschinenbau-Wissen.de - Die Maschinenbau-Community; Internetquelle: <http://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/stahl-eisen/38-einfluss-legierungselemente-stahl> (Stand: 19.03.2016)
- [59] Beitrag zur Entwicklung von neuen Traglaschenketten in der Fördertechnik; Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz; Dipl.-Ing. Frank Friedrich
- [60] Professur für Biomaterialien, Praktikum Werkstoffwissenschaft; Praktikum zur Vorlesung Werkstoffwissenschaft April 2011; Zugversuch; Institut für Werkstoffwissenschaft ; TU Dresden



- [61] Tribometrie: Prüf- und Meßtechnik für Reibungs-, Verschleiß- und Schmierungsvorgänge; Heinrich Jünemann und 4 Mitautoren; Band 547; Expert-Verlag
- [62] Giesserei Lexikon; Ausgabe 2008; 19.Auflage; Autor Stephan Hasse; Verlag Schiele und Schön